



**TUGAS AKHIR - TE141599**

**STUDI ANALISIS DAN MITIGASI HARMONISA  
PADA PT. SEMEN INDONESIA PABRIK ACEH**

Stefanus Suryo Sumarno  
NRP 2214 105 079

Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.  
Ir. Ni Ketut Aryani, MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016



**FINAL PROJECT - TE141599**

**HARMONIC ANALYSIS AND MITIGATION STUDY  
AT PT. SEMEN INDONESIA ACEH PLANT**

Stefanus Suryo Sumarno  
NRP 2214 105 079

Advisor  
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.  
Ir. Ni Ketut Aryani, MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2016

**STUDI ANALISIS DAN MITIGASI HARMONISASI  
PADA PT. SEMEN INDONESIA PABRIK ACEH**

**TUGAS AKHIR**

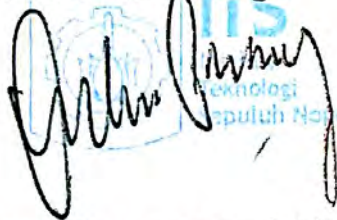
**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

**Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Jurusan Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing I**



**Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.**  
**NIP. 194907151974121001**

**Dosen Pembimbing II**



**Ir. Ni Ketut Aryani, MT.**  
**NIP. 196509011991032002**



## **STUDI ANALISIS DAN MITIGASI HARMONISA PADA PT. SEMEN INDONESIA PABRIK ACEH**

Nama : Stefanus Suryo Sumarno  
NRP : 2214105079  
Dosen Pembimbing 1 : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.  
Dosen Pembimbing 2 : Ir. Ni Ketut Aryani, MT.

### **ABSTRAK**

PT. Semen Indonesia merupakan salah satu perusahaan dalam negeri yang bergerak di bidang produksi semen. PT. Semen Indonesia sedang mendirikan pabrik baru di Aceh. PT. Semen Indonesia menggunakan motor-motor induksi dalam proses produksi semen. Untuk mengendalikan kecepatan putaran motor-motor induksi tersebut diperlukan VFD (Variable Frequency Drive). VFD merupakan salah satu beban non linear sehingga penggunaannya akan menimbulkan munculnya harmonisa pada sistem kelistrikan di pabrik ini. Harmonisa jika dibiarkan terus-menerus akan menimbulkan masalah pada peralatan listrik lainnya seperti transformator, motor, dan kabel. Masalah-masalah tersebut pada akhirnya berujung pada kerugian ekonomi. Oleh karena itu perlu dilakukan studi harmonisa dan mitigasi untuk mengurangi harmonisa pada PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh.

Mitigasi harmonisa dilakukan dengan pemasangan filter single tuned. Filter yang dipasang berhasil meredam harmonisa dan memperbaiki faktor daya. Nilai THD V dan THD I di bus MV dibawah 5%. Simulasi dan analisis dilakukan dengan menggunakan software ETAP 12.6.

**Kata kunci :** *VFD, Harmonisa, Filter Single Tuned, Faktor Daya.*

(Halaman ini Sengaja dikosongkan)

## **HARMONIC ANALYSIS AND MITIGATION STUDY AT PT. SEMEN INDONESIA ACEH PLANT**

Name : Stefanus Suryo Sumarno  
NRP : 2214105079  
Counsellor Lecturer 1 : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.  
Counsellor Lecturer 2 : Ir. Ni Ketut Aryani, MT.

### **ABSTRACT**

PT. Semen Indonesia is one of the domestic companies that engaged in the production of cement. PT. Semen Indonesia is creating a new plant in Aceh. PT. Semen Indonesia using induction motors in the cement production process. For controlling the rotational speed of induction motors required VFD (Variable Frequency Drive). VFD is one of the non-linear load so that its use will lead to the emergence of harmonics on the electrical system in this plant. Harmonics if allowed to continue will cause problems on other electrical equipments such as transformers, motors, and cables. Those problems eventually lead to economic losses. It is therefore necessary to study harmonics and mitigation to reduce harmonics at PT. Indonesia Aceh cement plant.

Mitigation of harmonics has been done with the installation of a single tuned filter. Installed filter successfully dampen harmonics and improve the power factor. THD V and THD I values in MV bus is below 5%. Simulation and analysis conducted using software ETAP 12.6.

***Keywords : VFD, Harmonics, Single Tuned Filter, Power Factor.***

(Halaman ini Sengaja dikosongkan)

# DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR</b>	
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b>	
<b>ABSTRAK</b>	i
<b>ABSTRACT</b>	iii
<b>KATA PENGANTAR</b>	v
<b>DAFTAR ISI</b>	vii
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	ix
<b>DAFTAR TABEL</b>	xi
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	1
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi	2
1.6 Sistematika Penulisan	3
1.7 Relevansi dan Manfaat	3
<b>BAB II HARMONISA SISTEM TENAGA LISTRIK</b>	5
2.1 Kualitas Daya	5
2.2 Faktor Daya	5
2.3 Harmonisa Sistem Tenaga Listrik	7
2.4 Penyebab Harmonisa	8
2.5 Sumber-Sumber Harmonisa di Industri	9
2.5.1 Konverter 3 Fasa	10
2.5.2 Tanur Busur	11
2.5.3 Transformator dan Motor Induksi	11
2.6 Tegangan dan Arus Harmonisa	11
2.7 Pengaruh Harmonisa	12
2.8 Indeks Harmonisa	13
2.9 Metode Fourier	15
2.10 Resonansi	16
2.11 Studi Harmonisa	19
2.12 Mitigasi Harmonisa	19



2.12.1 Mengurangi Arus Harmonisa .....	19
2.12.2 Menambahkan Filter Harmonisa .....	19
2.12.3 Modifikasi Respon Frekuensi Sistem .....	20
2.13 VFD (Variable Frequency Drive).....	20
2.14 Filter Pasif.....	21
<b>BAB III SISTEM KELISTRIKAN PT. SEMEN INDONESIA</b>	
<b>PABRIK ACEH .....</b>	<b>25</b>
3.1 Sistem Kelistrikan PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh.....	25
3.2 Beban Listrik pada PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh .....	27
3.3 Sumber Harmonisa PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh .....	30
3.4 Langkah-Langkah Peredaman Harmonisa pada PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh.....	31
<b>BAB IV SIMULASI DAN ANALISA.....</b>	<b>35</b>
4.1 Pengujian Filter Pasif Single Tuned.....	35
4.2 Simulasi dan Analisa Aliran Daya Kondisi Awal Sistem .....	41
4.3 Perancangan Kapasitor Bank.....	44
4.4 Simulasi dan Analisa Aliran Daya Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan kapasitor Bank .....	47
4.5 Simulasi dan Analisa Harmonisa Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan kapasitor Bank.....	49
4.6 Perancangan Filter Pasif Single Tuned.....	53
4.7 Simulasi dan Analisa Harmonisa Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Filter Harmonisa .....	67
<b>BAB V PENUTUP .....</b>	<b>71</b>
5.1 Kesimpulan .....	71
5.2 Saran .....	72
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>73</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>77</b>
<b>BIODATA PENULIS .....</b>	<b>79</b>

## DAFTAR TABEL

TABEL	HALAMAN
<b>Tabel 2.1</b> Urutan Fasa Harmonisa .....	8
<b>Tabel 2.2</b> Batas Distorsi Tegangan Berdasarkan IEEE Std 519-1992.....	14
<b>Tabel 2.3</b> Batas Distorsi Arus Berdasarkan IEEE Std 519-1992 .....	14
<b>Tabel 3.1</b> Daya Suplai PLN pada PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh .....	25
<b>Tabel 3.2</b> Data Transformator 3 Belitan .....	26
<b>Tabel 3.3</b> Data Transformator 2 Belitan .....	26
<b>Tabel 3.4</b> Data Transformator 2 Belitan (Lanjutan).....	27
<b>Tabel 3.5</b> Electrical Room pada PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh .....	28
<b>Tabel 3.6</b> Kapasitor Bank dan Reaktor pada motor .....	28
<b>Tabel 3.7</b> Data Beban Motor Induksi .....	29
<b>Tabel 3.8</b> Data VFD (Variable Frequency Drive).....	30
<b>Tabel 4.1</b> Hasil Simulasi Pengujian Filter Single Tuned.....	38
<b>Tabel 4.2</b> Hasil Simulasi Pengujian Filter Single Tuned Setelah Nilai Daya Reaktif diganti.....	41
<b>Tabel 4.3</b> Hasil Simulasi Aliran Daya pada Bus 6,3 kV (MV) dan 150 kV Kondisi Awal Sistem Kelistrikan.....	42
<b>Tabel 4.4</b> Hasil Simulasi Aliran Daya pada Bus 0,4 kV (LV) Kondisi Awal Sistem Kelistrikan .....	43
<b>Tabel 4.5</b> Kapasitor Bank Pada Sistem.....	47
<b>Tabel 4.6</b> Hasil Simulasi Aliran Daya pada Bus 6,3 kV (MV) dan 150 kV Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Kapasitor Bank.....	48
<b>Tabel 4.7</b> Hasil Simulasi Aliran Daya pada Bus 0,4 kV (LV) Kondisi Awal Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Kapasitor Bank.....	48
<b>Tabel 4.8</b> Hasil Simulasi Aliran Daya pada Bus 0,4 kV (LV) Kondisi Awal Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Kapasitor Bank (Lanjutan) .....	49
<b>Tabel 4.9</b> Standar Nilai TDD Bus 6,3 kV (MV) .....	50
<b>Tabel 4.10</b> Standar Nilai TDD Bus 0,4 kV (LV).....	51

<b>Tabel 4.11</b>	Hasil Simulasi Harmonisa pada Bus 6,3 kV (MV) dan 150 kV Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Kapasitor Bank 51	
<b>Tabel 4.12</b>	Hasil Simulasi Harmonisa pada Bus 6,3 kV (MV) dan 150 kV Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Kapasitor Bank (Lanjutan).....	51
<b>Tabel 4.13</b>	Hasil Simulasi Harmonisa pada Bus 0,4 kV Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Kapasitor Bank.....	52
<b>Tabel 4.14</b>	Hasil Simulasi Harmonisa pada Bus 0,4 kV Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Kapasitor Bank (Lanjutan) .....	53
<b>Tabel 4.15</b>	Parameter Filter Terpasang Pada Sistem.....	66
<b>Tabel 4.16</b>	Parameter Filter Terpasang Pada Sistem (Lanjutan).....	67
<b>Tabel 4.17</b>	Hasil Simulasi Harmonisa pada Bus 6,3 kV (MV) dan 150 kV Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Filter Pasif Single Tuned .....	67
<b>Tabel 4.18</b>	Hasil Simulasi Harmonisa pada Bus 6,3 kV (MV) dan 150 kV Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Filter Pasif Single Tuned (Lanjutan).....	68
<b>Tabel 4.19</b>	Hasil Simulasi Harmonisa pada Bus 0,4 kV Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Filter Pasif Single Tuned .....	68
<b>Tabel 4.20</b>	Hasil Simulasi Harmonisa pada Bus 0,4 kV Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Filter Pasif Single Tuned (Lanjutan).....	69

## DAFTAR GAMBAR

GAMBAR	HALAMAN
<b>Gambar 2.1</b> Hubungan Daya Pada Rangkaian AC .....	6
<b>Gambar 2.2</b> Pemasangan Kapasitor Bank Hubungan Wye Delta ....	7
<b>Gambar 2.3</b> Bentuk Gelombang yang Mengandung Harmonisa.....	8
<b>Gambar 2.4</b> Harmonisa yang disebabkan Oleh Beban Non Linear .	9
<b>Gambar 2.5</b> Arus dan Spektrum Harmonisa yang ditimbulkan oleh Konverter Pengatur Kecepatan Motor .....	10
<b>Gambar 2.6</b> Rangkaian Pengatur Kecepatan Motro Tipe PWM .....	11
<b>Gambar 2.7</b> Arus Harmonisa Menimbulkan Tegangan Harmonisa .	12
<b>Gambar 2.8</b> Sistem dengan Resonansi Paralel.....	17
<b>Gambar 2.9</b> Sistem dengan Resonansi Seri.....	18
<b>Gambar 2.10</b> Respon Frekuensi Sistem Ketika Terjadi Resonansi....	18
<b>Gambar 2.11</b> Rangkaian VFD.....	20
<b>Gambar 2.12</b> Pemasangan Filter Harmonisa .....	21
<b>Gambar 2.13</b> Rangkaian Single Tuned Filter.....	22
<b>Gambar 2.14</b> Rangkaian Double Tuned Filter.....	22
<b>Gambar 2.15</b> Rangkaian High Pass Damped Filter.....	23
<b>Gambar 3.1</b> Flowchart Metodologi Peredaman Harmonisa pada PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh .....	32
<b>Gambar 4.1</b> Single Line Diagram Uji Coba .....	35
<b>Gambar 4.2</b> Spektrum Bus MV003.....	36
<b>Gambar 4.3</b> Bentuk Gelombang Tegangan Bus MV003 .....	36
<b>Gambar 4.4</b> Filter Single Tuned Dipasang di Bus MV003.....	38
<b>Gambar 4.5</b> Kurva Z Magnitude Bus MV003 Sebelum Pemasangan Kapasitor .....	39
<b>Gambar 4.6</b> Kurva Z Magnitude Bus MV003 Setelah Pemasangan Kapasitor .....	39
<b>Gambar 4.7</b> Spektrum Bus MV003 Setelah Pemasangan Filter.....	40
<b>Gambar 4.8</b> Bentuk Gelombang Tegangan Bus MV003 Setelah Pemasangan Filter .....	40
<b>Gambar 4.9</b> Spektrum Harmonisa di Bus 831MV012 .....	48
<b>Gambar 4.10</b> Spektrum Harmonisa di Bus 831MV021 .....	48
<b>Gambar 4.11</b> Spektrum Harmonisa di Bus 831MV041 .....	48
<b>Gambar 4.12</b> Spektrum Harmonisa di Bus 831MV051 .....	48
<b>Gambar 4.13</b> Spektrum Harmonisa di Bus 831MV052 .....	48

**Gambar 4.14** Spektrum Harmonisa di Bus 831MV071..... 48

**Gambar 4.15** Spektrum Harmonisa di Bus 831MV081..... 48

**Gambar 4.16** Spektrum Harmonisa di Bus 831MV082..... 48

(Halaman ini Sengaja dikosongkan)

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

PT. Semen Indonesia, perusahaan dalam negeri yang bergerak dalam bidang produksi semen, menggunakan motor-motor listrik dalam proses produksinya. Motor-motor listrik ini dapat dikendalikan kecepatannya dengan menggunakan VFD (variable frequency drive). VFD merupakan salah satu beban non linear. Beban non linear adalah beban yang bentuk gelombang arus maupun tegangan keluarannya tidak sama dengan gelombang masukannya (mengalami distorsi). Beban non linear dapat mengakibatkan munculnya harmonisa. Harmonisa jika nilainya sudah diluar batas kewajaran dapat mempengaruhi sistem kelistrikan dan dapat menimbulkan masalah pada peralatan-peralatan listrik. Dampak harmonisa jika dibiarkan akan menimbulkan kerugian teknis dan finansial bagi pihak perusahaan.

Harmonisa tidak bisa dihilangkan secara keseluruhan, tetapi dapat diredam nilainya sampai berada dalam batas aman. Banyak cara yang bisa dilakukan untuk meredam harmonisa, tetapi yang paling sering dilakukan adalah dengan pemasangan filter pasif pada sistem kelistrikan. Sebelum merencanakan sebuah filter, terlebih dahulu kita harus melakukan studi harmonisa untuk mengetahui kondisi harmonisa di sistem kelistrikan tersebut. Pada tugas akhir ini dilakukan studi analisis dan mitigasi harmonisa menggunakan software ETAP 12.6. Mitigasi harmonisa dilakukan dengan menggunakan filter single tuned. Setelah mitigasi dilaksanakan, maka dilakukan pengecekan ulang kondisi harmonisa pada sistem.

### **1.2. Perumusan Masalah**

Permasalahan yang dibahas pada tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana kondisi aliran daya dan harmonisa pada sistem kelistrikan PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh ?
2. Bagaimana merancang filter single tuned untuk meredam harmonisa ?
3. Bagaimana kondisi harmonisa pada sistem kelistrikan PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh setelah filter single tuned dipasang ?

### **1.3. Tujuan**

Tujuan yang ingin dicapai dari tugas akhir ini adalah:

1. Melaksanakan studi analisis harmonisa sistem kelistrikan di PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh yang disimulasikan dengan software ETAP 12.6.
2. Merancang filter pasif single tuned untuk mitigasi harmonisa sistem kelistrikan PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh.

### **1.4. Pembatasan Masalah**

Agar pengerjaan tugas akhir tidak menyimpang dari ketentuan yang dibuat, maka permasalahan dibatasi dengan asumsi sebagai berikut

1. Pemodelan dan simulasi sistem kelistrikan PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh menggunakan software ETAP 12.6.
2. Simulasi dan analisa harmonisa dilakukan pada kondisi steady state.
3. Mitigasi harmonisa dilakukan menggunakan filter single tuned.
4. Pembahasan difokuskan pada harmonisa yang dihasilkan oleh beban-beban VFD yang dipasang pada sistem tenaga listrik PT. Semen Indonesia pabrik Aceh.
5. Tegangan dan arus bolak-balik diseluruh jaringan adalah seimbang. Bentuk gelombang yang cacat karena harmonisa diasumsikan masih simetri di tiap-tiap fasa.
6. Analisa harmonisa dalam tugas akhir ini menggunakan standart IEEE-std 519-1992.

### **1.5. Metodologi**

Metodologi yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur  
Mengumpulkan buku, paper, dan referensi mengenai harmonisa sistem tenaga listrik.
2. Pengumpulan Data  
Pengumpulan data-data sistem kelistrikan dan single line diagram dari PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh untuk pemodelan sistem
3. Pemodelan dan Simulasi  
Pemodelan data-data sistem kelistrikan PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh dan simulasi dilakukan dengan menggunakan software ETAP 12.6.



4. Analisis  
Hasil simulasi aliran daya dan harmonisa pada sistem kelistrikan PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh dianalisa, kemudian dilakukan mitigasi untuk meredam harmonisa.
5. Pembuatan Buku Tugas Akhir  
Menulis buku tugas akhir yang berisikan hasil dari tugas akhir yang telah dilakukan.

## **1.6. Sistematika Pembahasan**

Sistematika bahasan pada penyusunan proyek akhir ini direncanakan sebagai berikut :

### **BAB 1 : Pendahuluan**

Bab ini membahas pendahuluan yang terdiri dari latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi, pembatasan masalah, sistematika pembahasan proyek akhir.

### **BAB 2 : Harmonisa Sistem Tenaga Listrik**

Bab ini membahas tentang teori-teori yang menunjang dalam Studi Analisis dan Mitigasi Harmonisa pada PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh

### **BAB 3 : Sistem Kelistrikan PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh**

Bab ini membahas sistem tenaga listrik yang ada di PT. Semen Indonesia pabrik Aceh.

### **BAB 4: Simulasi Dan Analisis**

Bab ini membahas simulasi yang telah dibuat, serta analisis hasil simulasi.

### **BAB 5 : Penutup**

Bab ini berisi kesimpulan dari proyek akhir yang telah dibuat, beserta saran – saran yang dapat digunakan untuk meningkatkan proyek akhir yang telah dibuat.

## **1.7. Relevansi**

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Dapat memberikan solusi untuk permasalahan harmonisa di industri.

2. Meningkatkan penguasaan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang kualitas daya.
3. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang hendak mengambil permasalahan yang serupa untuk Tugas Akhirnya.

## **BAB II**

### **HARMONISA SISTEM TENAGA LISTRIK**

#### **2.1. Kualitas Daya**

Kualitas daya dapat didefinisikan sebagai nilai kinerja / keandalan pada suatu sistem tenaga listrik. Sedangkan masalah kualitas daya didefinisikan sebagai masalah daya listrik yang mengakibatkan gangguan atau penyimpangan pada tegangan, arus, dan frekuensi yang dapat mengakibatkan kerusakan pada peralatan listrik.

Macam-macam masalah kualitas daya adalah :

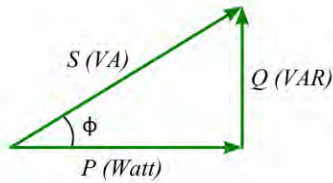
1. Transient tegangan
2. Perubahan tegangan
3. Ketidakseimbangan tegangan dan fasa
4. Distorsi bentuk gelombang / harmonisa
5. Perubahan frekuensi
6. Fluktuasi tegangan
7. Deviasi faktor daya

Pada masa lampau ketika masalah kualitas daya timbul, banyak konsumen tenaga listrik yang beranggapan bahwa permasalahan tersebut berasal dari sisi sumber tegangan atau PLN. Setelah dilakukan banyak penelitian dan analisa, diketahui bahwa permasalahan kualitas daya banyak terjadi karena efek dari beban listrik yang digunakan oleh para konsumen. Alasan utama mengapa permasalahan kualitas daya harus dipelajari karena hal tersebut dapat menyebabkan kerugian ekonomi. Pada sebuah industri, masalah kualitas daya harus diperhatikan agar tidak mengganggu proses produksi pada industri tersebut. Beberapa masalah kualitas daya yang sering terjadi di industri adalah nilai faktor daya yang buruk karena penggunaan motor induksi dan timbulnya harmonisa karena penggunaan beban non linear.

#### **2.2. Faktor Daya**

Pada sebuah rangkaian AC (Alternating Current) terdapat 3 jenis daya yaitu daya semu (S), daya aktif (P) dan daya reaktif (Q). Hubungan daya pada rangkaian AC dapat dilihat pada Gambar 2.1. Faktor daya ( $\cos \theta$ ) merupakan perbandingan antara daya aktif (P) terhadap daya semu (S) pada sistem tenaga listrik. Rumus faktor daya adalah sebagai berikut:

$$\text{Faktor Daya } (\cos \theta) = \frac{\text{Daya Aktif}}{\text{Daya Semu}} = \frac{kW}{kVA} \quad (2.1)$$



**Gambar 2.1** Hubungan Daya Pada Rangkaian AC

Suatu sistem tenaga listrik yang baik harus memiliki nilai faktor daya mendekati 1 (Unity). Akan tetapi pada PT. Semen Indonesia banyak menggunakan beban-beban listrik yang dapat mengurangi nilai faktor daya seperti beban motor induksi. Oleh karena itu pada sistem tenaga listrik di PT. Semen Indonesia harus dipasang alat yang dapat memperbaiki nilai faktor daya yaitu Kapasitor Bank. Dibawah ini adalah rumus untuk mencari rating kVAR kapasitor bank yang digunakan untuk memperbaiki faktor daya.

$$\tan \theta = \frac{\text{Daya reaktif}}{\text{Daya aktif}} = \frac{kVAR}{kW} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \text{Daya reaktif} &= \text{Daya aktif} \times \tan \theta \\ Q &= P \times \tan \theta \text{ (kVAR)} \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \text{Daya reaktif pada faktor daya awal} \\ Q &= P \times \tan \theta_1 \text{ (kVAR)} \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \text{Daya reaktif pada faktor daya yang diinginkan} \\ Q &= P \times \tan \theta_2 \text{ (kVAR)} \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \text{Sehingga} \\ Q &= P (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \text{ (kVAR)} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Kapasitor bank berfungsi untuk menyediakan daya reaktif yang dibutuhkan oleh beban, sehingga aliran daya reaktif dari sumber dapat dihindari, sehingga kerugian akibat daya reaktif dapat berkurang. Pada umumnya kapasitor dipasang secara paralel dengan sistem. Penempatan kapasitor bank ada 3 macam, yaitu:

1. *Central Compensation*

Kapasitor bank diletakkan pada high voltage incoming feeder.

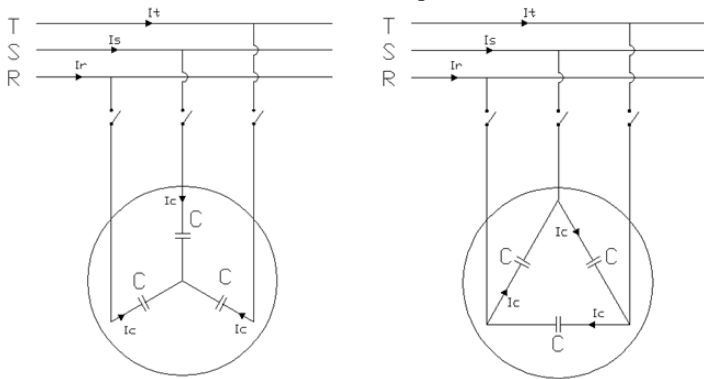
## 2. *Group Compensation*

Kapasitor bank diletakkan pada medium voltage atau low voltage atau pada bus.

## 3. *Individual Compensation*

Kapasitor bank diletakkan pada setiap beban.

Pada sistem 3 fasa, kapasitor bank dapat dipasang dengan hubungan bintang maupun hubungan delta seperti pada Gambar 2.2.



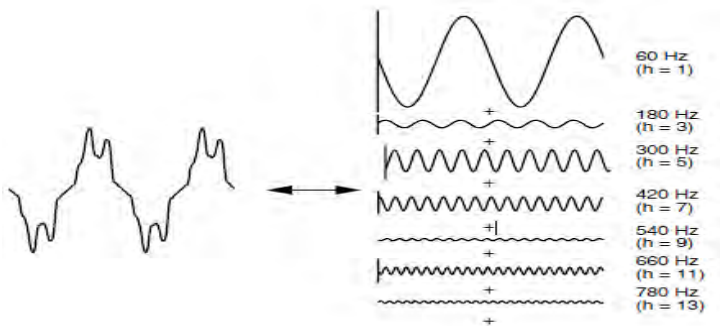
**Gambar 2.2** Pemasangan Kapasitor Bank Hubungan Wye dan Delta

## 2.3. Harmonisa Sistem Tenaga Listrik

Harmonisa dalam sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai gelombang terdistorsi secara periodik pada keadaan steady state yang disebabkan oleh interaksi antara bentuk gelombang sinus sistem pada frekuensi fundamental dengan komponen gelombang lain yang merupakan frekuensi kelipatan integer dari frekuensi fundamental sumber. Bila gelombang dengan frekuensi kelipatan integer tersebut digabungkan dengan gelombang sinus dengan frekuensi sumber akan menghasilkan gelombang yang terdistorsi (non-sinusoidal) seperti Gambar 2.3.

Setiap orde harmonisa memiliki urutan fasa yaitu positif (+), negatif (-), dan nol (0) seperti yang diperlihatkan pada Tabel 2.1. Setiap urutan fasa harmonisa memiliki efek yang berbeda-beda. Urutan positif menimbulkan panas berlebih pada konduktor atau saluran. Urutan negatif menimbulkan torsi lawan pada motor listrik yang menyebabkan

motor berlawanan arah putarnya. Urutan nol meningkatkan arus kontribusi pada kawat netral.



**Gambar 2.3** Bentuk Gelombang yang Mengandung Harmonisa

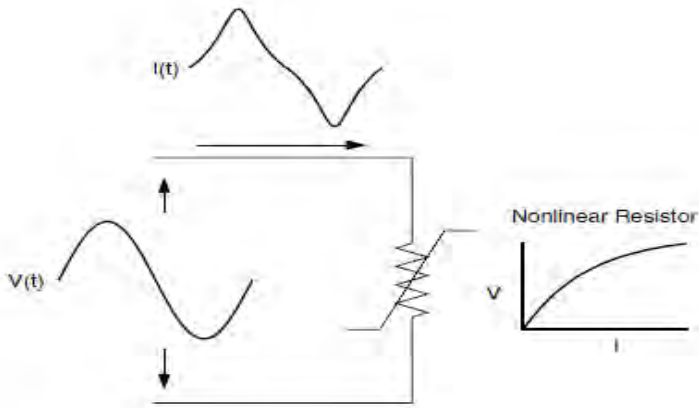
**Tabel 2.1** Urutan Fasa Harmonisa

Orde Harmonisa	Frekuensi (Hz)	Urutan
1	50	+
2	100	-
3	150	0
4	200	+
5	250	-
6	300	0
...	...	...

## 2.4. Penyebab Harmonisa

Harmonisa pada sistem tenaga listrik disebabkan oleh beban-beban non-linear. Beban non-linear yang dimaksud adalah peralatan elektronika daya yang menggunakan komponen semi-konduktor seperti mosfet, SCR, dan IGBT. Komponen semi-konduktor tersebut menghubungkan dan memutus (switching) arus sesuai dengan algoritma kontrol tertentu. Proses switching tersebut jarang berimpit dengan zero crossing dari gelombang sumber/supply; sehingga mengakibatkan timbulnya pulsa-pulsa arus. Pulsa-pulsa arus tersebut mengakibatkan timbulnya harmonisa sehingga walaupun tegangan sumber yang digunakan murni sinusoidal, arus yang dihasilkan akan

berbentuk non-sinusoidal dan akan mengandung harmonisa. Ilustrasi beban non-linear penyebab harmonisa dapat dilihat pada Gambar 2.4.



**Gambar 2.4** Harmonisa yang disebabkan oleh Beban Non Linear

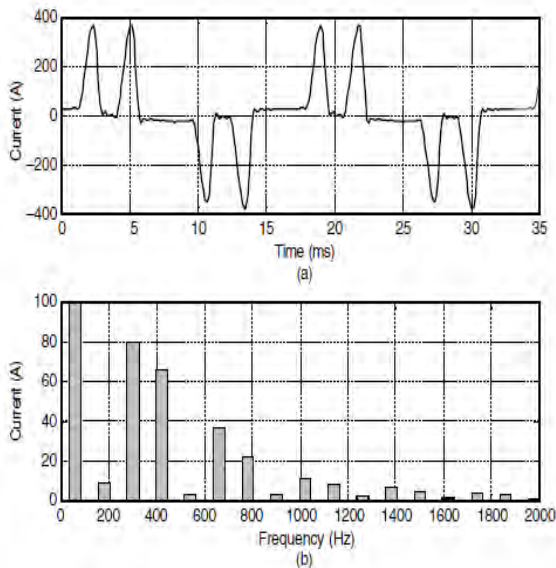
## 2.5. Sumber-Sumber Harmonisa di Industri

Industri modern saat ini banyak menggunakan beban non-linear dalam proses produksinya. Beban-beban tersebut dapat menghasilkan arus harmonisa ke sistem kelistrikan sehingga menimbulkan gangguan pada tegangan di sistem tersebut. Pada umumnya beban-beban listrik di industri seperti motor induksi memiliki faktor daya yang rendah, sehingga industri seringkali memasang kapasitor bank untuk meningkatkan faktor daya tersebut, sehingga terhindar dari denda yang diberikan oleh PLN jika nilai faktor daya suatu industri nilainya dibawah standart.

Penggunaan kapasitor bank pada sistem berpotensi meningkatkan harmonisa pada sistem tersebut dan juga dapat meningkatkan resonansi di sistem kelistrikan tersebut. Gangguan tegangan biasanya terjadi paling parah di bus dengan tegangan rendah yang dipasangi kapasitor bank. Resonansi dapat mengakibatkan motor dan transformer menjadi lenih panas dari yang seharusnya. Beban non-linear pada industri meliputi konverter 3 fasa, tanur busur dan peralatan seperti transformator dan mesin-mesin berputar.

### 2.5.1. Konverter 3 Fasa

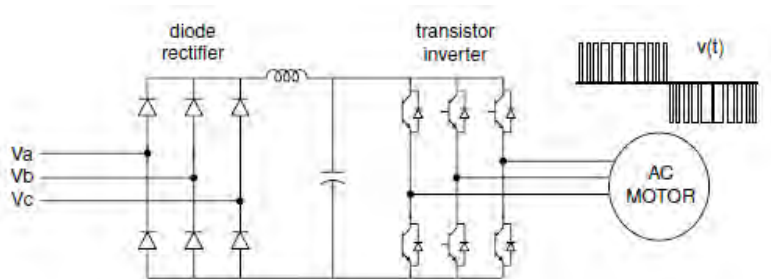
Konverter 3 fasa digunakan pada peralatan pengatur kecepatan motor listrik. Konverter 3 fasa menggunakan komponen semi-konduktor untuk melakukan proses switching saat mengatur kecepatan dari motor listrik. Proses switching komponen semi-konduktor ini menimbulkan arus harmonisa. Pengatur kecepatan motor tipe PWM (Membutuhkan gelombang PWM sebagai inputnya) dapat menghasilkan gangguan tingkat tinggi yang dapat dilihat pada Gambar 2.5. Rangkaian pengatur kecepatan motor tipe PWM terdiri dari dioda sebagai rectifier dan transistor sebagai inverter, dapat dilihat pada Gambar 2.6.



**Gambar 2.5** Arus dan Spektrum Harmonisa yang ditimbulkan oleh konverter Pengatur kecepatan Motor

Arus harmonisa yang ditimbulkan oleh pengatur kecepatan motor bersifat tidak konstan. Bentuk gelombang tersebut berubah-ubah seiring dengan perubahan kecepatan dan torsi motor.





**Gambar 2.6** Rangkaian Pengatur Kecepatan Motor Tipe PWM

### 2.5.2. Tanur Busur

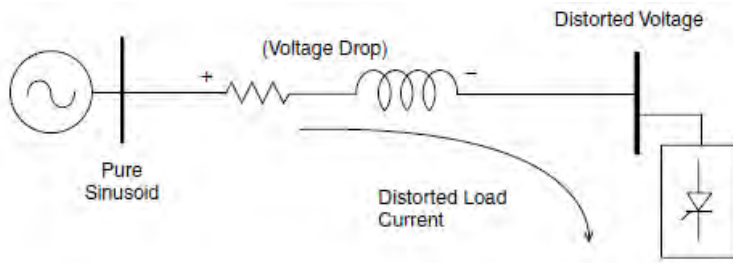
Tanur busur digunakan pada industri logam dalam proses peleburan logam. Karakteristik tegangan dan arus pada tanur busur bersifat non-linear. Ketika tanur busur dinyalakan dan busur api muncul, maka tegangan akan mengalami penurunan tetapi arus akan mengalami peningkatan. Oleh karena perubahan nilai tegangan dan arus secara periodik tersebut, maka bentuk gelombang dan arus pada tanur busur akan mengalami gangguan dan harmonisa akan timbul.

### 2.5.3. Transformator dan Mesin-Mesin Berputar

Peralatan saturasi meliputi transformator dan motor atau lebih tepatnya peralatan elektromagnetik dengan inti besi. Harmonisa ditimbulkan karena magnetisasi yang non-linear pada inti besi. Generator sinkron dan motor-motor induksi menimbulkan harmonisa karena kejenuhan dan distribusi fluks yang tidak sinusoidal, sehingga EMF yang terbangkit tidak sinusoidal dan menghasilkan arus harmonisa jika dibebani.

## 2.6. Tegangan dan Arus Harmonisa

Pada dasarnya beban non-linear adalah sumber dari arus harmonisa pada sistem tenaga. Arus harmonisa ini akan mengalir melalui jaringan sistem sehingga akan menimbulkan tegangan harmonisa seperti ilustrasi pada Gambar 2.7



**Gambar 2.7** Arus Harmnisa Menimbulkan Tegangan Harmonisa

Terkadang terjadi kasus dimana variable speed drive atau induction furnace tidak bisa bekerja dengan baik, hal tersebut mungkin terjadi karena beberapa hal ini:

- Tegangan harmonisa terlalu besar (bentuk gelombang tegangan terlalu cacat) sehingga tidak bisa mengatur sudut penyalan dari variable speed drive dengan baik
- Arus harmonisa terlalu besar dan melampaui kapasitas dari beberapa peralatan sumber tegangan seperti transformer, sehingga transformer beroperasi dibawah rating dayanya.
- Tegangan harmonisa terlalu besar karena arus harmonisa terlalu besar sehingga sistem tidak bisa menaha kondisi tersebut.

## 2.7. Pengaruh Harmonisa

Harmonisa dapat menimbulkan dampak buruk bagi peralatan-peralatan listrik lainnya seperti transformator, motor, relay pengaman, dan penghantar atau kabel. Berikut ini adalah pengaruh harmonisa pada beberapa peralatan:

### 2.7.1 Pengaruh Pada Mesin-Mesin Berputar

Harmonisa mengakibatkan rugi pada belitan stator, rangkaian rotor, dan laminasi pada stator dan rotor meningkat. Rugi-rugi pada konduktor stator dan rotor lebih besar daripada rugi-rugi yang disebabkan resistansi DC karena arus Eddy atau efek kulit.

### **2.7.2. Pengaruh Pada Transformator**

Arus Harmonisa meningkatkan rugi-rugi histerisis dan arus *Eddy* serta tekanan isolasi. Arus harmonisa juga meningkatkan rugi-rugi tembaga. Arus beban yang mengandung harmonisa akan mengakibatkan transformator mengalami panas yang berlebih. Pada transformator daya terdapat arus sirkulasi harmonisa ketiga urutan nol pada belitan delta. Sirkulasi arus yang berlebihan dapat melampaui batas kemampuan belitan sehingga dapat merusak belitan transformator.

### **2.7.3. Pengaruh Pada Kapasitor Bank**

Ketika resonansi seri dan paralel antara kapasitor dan sistem dapat terjadi, tegangan dan arus akan mengalami kenaikan, sehingga meningkatkan rugi-rugi yang tinggi dan panas berlebih pada kapasitor yang sering menjadi penyebab kerusakan kapasitor bank.

ANSI/IEEE Standard 18-1980 menyatakan batasan pemakaian kapasitor pada frekuensi dasar dan harmonisa :

- a. kVar kapasitor pada frekuensi dasar dan harmonisa tidak melebihi 135% kVar nameplate-nya.
- b. Tegangan rms kapasitor pada frekuensi dasar dan harmonisa tidak melebihi 110% rating tegangannya.
- c. Arus rms kapasitor pada frekuensi dasar dan harmonisa tidak melebihi 180% rating arusnya.
- d. Tegangan kapasitor tidak melebihi 120% tegangan puncaknya.

### **2.7.4. Pengaruh Pada Rele Pengaman**

Rele pengaman biasanya diatur pada tegangan atau arus fundamental tanpa memperhitungkan timbulnya harmonisa. Apabila timbul harmonisa yang cukup tinggi, pembacaan alat ukur pada rele pengaman tersebut akan mengalami gangguan, Sehingga rele tidak dapat bekerja dengan baik.

Rele jarak disetting berdasarkan impedansi fundamental dari saluran transmisi dan kehadiran arus harmonisa (terutama harmonisa ketiga) dalam kondisi gangguan menyebabkan error pengukuran yang sangat besar karena harmonisa dapat mengakibatkan nilai impedansi berubah..

## **2.8. Indeks Harmonisa**

Sinyal harmonisa memiliki sifat destruktif terhadap sinyal fundamental serta nilai RMS sinyal secara keseluruhan. Besarnya

gangguan dari harmonisa terhadap sinyal fundamental dinotasikan dalam bentuk Prosentase Total Harmonic Distortion (THD). Nilai THD dapat dihitung menggunakan rumus :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_2^K U_n^2}}{U_1} \times 100\% \quad (2.7)$$

Keterangan:

K = Komponen harmonisa maksimum

Un = Komponen harmonisa yang diamati

U1 = Komponen fundamental

THD memiliki standarnilai yang dapat dilihat pada IEEE 519-1992 seperti pada Tabel 2.2 dan Tabel 2.3.

**Tabel 2.2** Batas Distorsi Tegangan Berdasarkan IEEE Std 519-1992

Tegangan Saluran pada PCC	Distorsi Tegangan Individu (%)	Jumlah Distorsi Tegangan THD (%)
69 kV dan di bawahnya	3,0	5,0
69.000,1 sampai 161 kV	1,5	2,5
161.000,1 dan di atasnya	1,0	1,5

**Tabel 2.3** Batas Distorsi Arus Berdasarkan IEEE Std 519-1992

Distorsi Harmonik Maksimum Arus dalam Persen dari $I_L$						
$I_{sc}/I_L$	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$\leq 35$	TDD
<20*	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Keterangan :

PCC = Titik antara ujung dari pengguna dengan sistem peralatan dimana pelanggan lain dilayani.

$I_{sc}$  = Arus hubung singkat pada PCC.  
 $I_L$  = Arus Beban Maksimum pada PCC.  
 $TDD$  = Total Demand Distortion

Sehingga untuk THD tegangan dan THD arus memiliki rumus sebagai berikut :

$$THD V = \frac{\sqrt{\sum_2^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (2.8)$$

$$THD I = \frac{\sqrt{\sum_2^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (2.9)$$

Keterangan:

$THD V$  = Distorsi Tegangan  
 $THD I$  = Distorsi Arus  
 $V_h$  = Tegangan Harmonisa  
 $I_h$  = Arus harmonisa  
 $I_1$  = Arus Fundamental

Total Demand Distortion (TDD) adalah perbandingan nilai RMS antara komponen arus harmonisa dengan arus demand maksimum. Rumus dari TDD adalah sebagai berikut :

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_2^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (2.10)$$

$I_L$  adalah arus beban demand maksimum pada frekuensi fundamental PCC.

## 2.9. Metode Fourier

Harmonisa dapat dianalisa lewat proses perhitungan nilai magnitude dan fasa dari gelombang periodik frekuensi fundamental dan orde tinggi. Metode Fourier menyebutkan bahwa suatu fungsi periodik dapat diuraikan menjadi fungsi-fungsi sinusoidal dengan frekuensi, amplitudo dan sudut fasa tertentu apabila memenuhi syarat-syarat sebagai berikut:

- a. Merupakan fungsi periodik  
 $f(\omega t) = f(\omega t + T)$  dengan  $T$  = periode

- b. Merupakan fungsi kontinyu atau fungsi tak kontinyu dengan jumlah ketidakkontinyuan yang tertentu selama satu periode
- c. Selama selang periode, fungsi harus mempunyai harga rata-rata tertentu
- d. Dalam satu periode  $T$ , fungsi harus mempunyai harga maksimum atau minimum yang jumlahnya tertentu.

Jika syarat-syarat diatas dipenuhi maka fungsi dapat diuraikan menjadi deret Fourier yang bentuknya sebagai berikut :

$$f(\omega t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (2.10)$$

Dengan :

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) d(\omega t) \quad (2.11)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad (2.12)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (2.13)$$

Penyederhanaan analisa Fourier dapat dilakukan dengan menggunakan sifat-sifat khusus sebagai berikut :

- a. Jika luas siklus positif dan negatif dalam satu periode sama maka  $a_0 = 0$ .
- b. Jika  $f(\omega t) = -f(\omega t + \pi)$  atau fungsi mempunyai simetri setengah gelombang maka tidak akan muncul harmonisa orde genap.
- c. Jika fungsi merupakan fungsi genap  $f(\omega t) = f(-\omega t)$  maka  $b_n = 0$
- d. Jika fungsi merupakan fungsi ganjil  $f(\omega t) = -f(\omega t + \pi)$  maka  $a_n = 0$

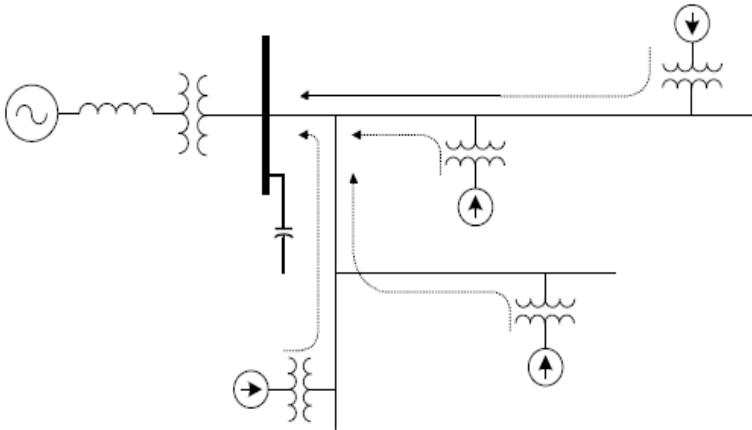
Dengan menggunakan Metode Fourier pada bentuk gelombang arus yang diserap oleh komponen atau beban penyebab harmonisa maka dapat ditentukan komponen-komponen harmonisa yang terbangkit. Dan selanjutnya dapat dihitung tingkat tegangan harmonisa pada jaringan.

## 2.10. Resonansi

Sistem kelistrikan yang mengandung kapasitansi dan induktansi memiliki satu atau lebih frekuensi dan memungkinkan terjadinya resonansi. Resonansi terjadi ketika nilai reaktansi induktif sama dengan

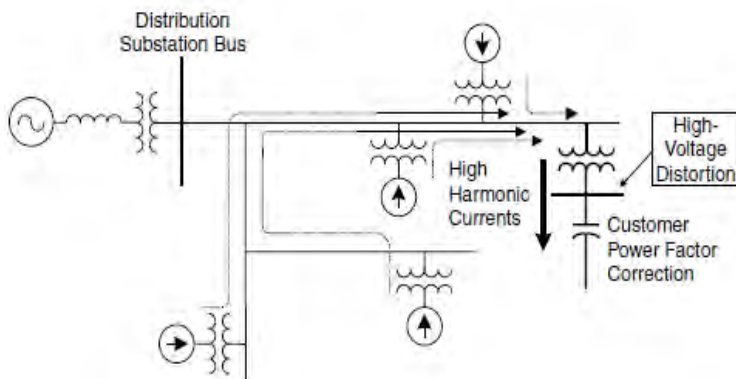
nilai reaktansi kapasitif ( $X_L = X_C$ ). Kapasitor bank yang dipasang untuk memperbaiki faktor daya dapat menimbulkan resonansi sistem yang diikuti dengan naiknya arus yang sangat besar yang merugikan kapasitor bank tersebut. Terdapat dua jenis resonansi pada sistem, yaitu resonansi paralel dan resonansi seri.

Resonansi paralel dapat terjadi ketika sebuah kapasitor bank dipasang di bus yang sama dengan sumber harmonisa yang bersifat induktif. Resonansi paralel menghasilkan impedansi yang tinggi pada busbar saat frekuensi resonansi. Impedansi yang tinggi pada busbar akan mengakibatkan busbar mengalami tegangan lebih atau *overvoltage*. Gambar 2.8 adalah Sistem dengan resonansi paralel.

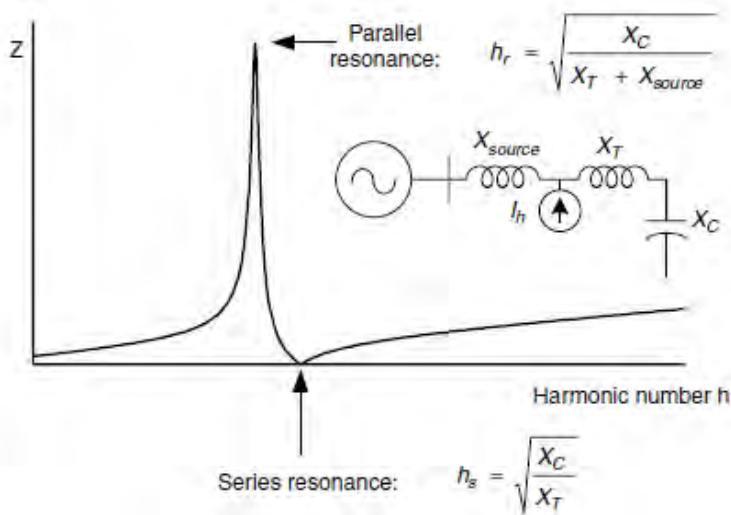


**Gambar 2.8** Sistem Dengan Resonansi Paralel

Resonansi seri terjadi ketika reaktansi kapasitor bank membentuk rangkaian seri dengan sumber harmonisa seperti pada Gambar 2.9. Resonansi seri dapat menurunkan nilai impedansi pada kapasitor. Pada saat merancang sebuah filter harmonisa, diibaratkan yang terjadi adalah resonansi seri. Pada saat frekuensi resonansi nilai impedansi turun, sehingga arus harmonisa pada frekuensi tersebut mengalir ke arah filter. Karena arus harmonisa diserap oleh filter, maka harmonisa yang ada pada bus akan berkurang atau dengan kata lain mengalami peredaman. Gambar 2.10 menunjukkan respon frekuensi sistem ketika mengalami resonansi.



**Gambar 2.9** Sistem Dengan Resonansi Seri



**Gambar 2.10** Respon Frekuensi Sistem ketika terjadi Resonansi

Ketika mengalami resonansi, nilai impedansi sistem akan mengalami perubahan. Nilai impedansi naik saat resonansi paralel, sebaliknya nilai impedansi akan turun saat resonansi seri.



## **2.11. Studi Harmonisa**

Studi harmonisa dilakukan untuk mengendalikan harmonisa dan menganggulangi masalah yang diakibatkannya. Studi harmonisa biasanya dilakukan apabila :

1. Ingin meredam harmonisa pada sistem yang telah ada.
2. Setelah pemasangan kapasitor bank, perlu dilakukan studi harmonisa untuk mengetahui apakah kapasitor tersebut mengakibatkan harmonisa diluar ambang batas standart nya.
3. Setelah pemasangan atau penambahan beban non-linear pada sistem, harus dilakukan studi harmonisa.
4. Sebelum melakukan perancangan harmonisa, studi harmonisa harus dilakukan terlebih dahulu untuk menentukan parameter-parameter dari filter harmonisa tersebut.
5. Ada saat nya penggunaan kapasitor bank sebagai kompensator daya reaktif ingin digantikan dengan filter karena filter juga dapat memberikan kompensasi daya reaktif sekaligus meredam harmonisa.

## **2.12. Mitigasi Harmonisa**

Harmonisa pada sistem kelistrikan sering timbul di industri. Harmonisa ini harus dikendalikan sebelum menjadi masalah dan berdampak pada peralatan listrik lainnya. Jika harmonisa telah menjadi masalah, maka hal-hal yang dapat dilakukan adalah :

1. Mengurangi arus harmonisa yang ditimbulkan beban.
2. Menambahkan filter harmonisa pada sistem kelistrikan.
3. Modifikasi respon frekuensi sistem.

### **2.12.1. Mengurangi Arus Harmonisa**

Jika terdapat transformer yang mengalami overeksitasi, maka harus dikembalikan pada keadaan normal, dapat dilakukan dengan cara menurunkan tegangan transformer. Menggunakan peralatan elektronika daya seperti konverter yang kinerjanya bagus dan harmonisa yang dihasilkan sedikit. Merubah hubungan belitan transformer juga dapat meredam arus harmonisa pada sistem 3 fasa.

### **2.12.2. Menambahkan Filter Harmonisa**

Pemasangan filter harmonisa secara paralel di dekat sumber harmonisa dapat meredam harmonisa. Filter harmonisa akan menyerap harmonisa tersebut, sehingga harmonisa tidak masuk ke dalam sistem.

Filter harmonisa juga bisa digunakan untuk memperbaiki faktor daya sistem.

### 2.12.3. Modifikasi Respon Frekuensi Sistem

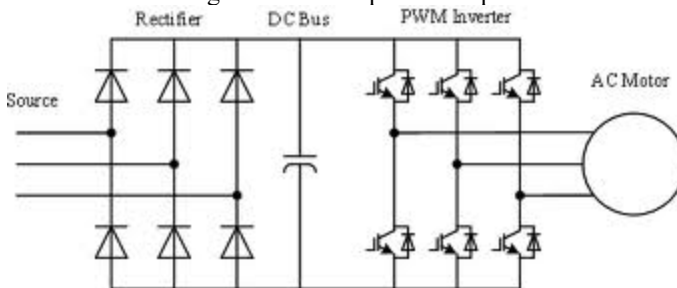
Modifikasi sistem respon dapat dilakukan dengan cara berikut ini :

1. Pemasangan filter harmonisa. Filter harmonisa dapat merubah respon sistem menjadi lebih baik.
2. Pemasangan reaktor. Resonansi biasanya terjadi antara induktansi sistem dan kapasitansi kapasitor bank. Oleh karena itu reaktor dipasang antara induktansi sistem dan kapasitor bank.
3. Merubah nilai kapasitansi kapasitor bank.
4. Melepas kapasitor bank. Meskipun melepas kapasitor bank dapat menimbulkan rugi-rugi daya lebih besar, tetapi dapat mengurangi harmonisa.

### 2.13. VFD (Variable Frequency Drive)

VFD adalah peralatan elektronika daya yang digunakan untuk mengatur kecepatan putaran motor. VFD terdiri dari konverter 3 fasa, seperti yang dijelaskan di sub bab sebelumnya bahwa VFD adalah salah satu sumber harmonisa. VFD banyak digunakan di PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh dan pada tugas akhir ini harmonisa yang di bahas adalah harmonisa yang timbul dari VFD.

Cara kerja VFD adalah mengubah tegangan AC 3 fasa dari sisi input menjadi tegangan DC dengan menggunakan rectifier 3 fasa. Tegangan DC tersebut kemudian akan disalurkan ke inverter 3 fasa untuk diubah menjadi tegangan AC 3 fasa dengan frekuensi yang bisa kita atur sesuai kebutuhan. Contoh rangkaian VFD dapat dilihat pada Gambar 2.11.



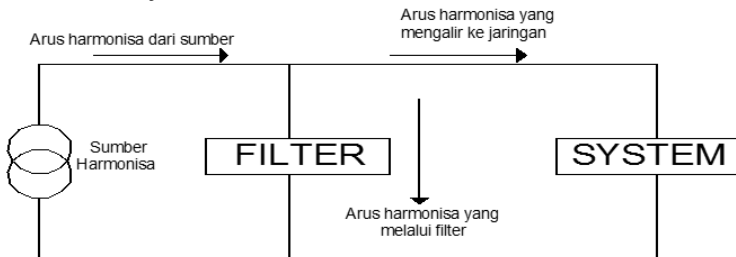
**Gambar 2.11** Rangkaian VFD

## 2.14. Filter Pasif

Salah satu cara mitigasi harmonisa adalah dngan menggunakan filter pasif. Filter pasif terdiri dari elemen induktansi, kapasitansi, dan resistansi. Elemen induktansi dan kapasitansi dari filter pasif dirancang untuk beresonansi pada frekuensi tertentu yang biasa kita sebut frekuensi resonansi. Sehingga apabila ada harmonisa dengan frekuensi yang sama dengan frekuensi resonansi, maka filter pasif akan menyerap harmonisa tersebut, sehingga harmonisa tersebut tidak masuk ke sistem atau setidaknya aman bagi sistem. Filter pasif juga dapat digunakan untuk mengkompensasi daya reaktif dan memperbaiki faktor daya. Pada umumnya terdapat 3 jenis filter yang sering digunakan, yaitu:

1. *Single Tuned Filter* (Filter dengan penalaan tunggal)
2. *Double Tuned Filter* (Filter dengan penalaan ganda)
3. *High Pass Damped Filter*

Filter pasif biasanya dipasang pada bus yang terdapat beban non linear atau pada bus dengan nilai THD yang tinggi. Pemasangan filter harmonisa ditunjukkan oleh Gambar 2.12.



**Gambar 2.12.** Pemasangan filter harmonisa

### 2.14.1. Single Tuned Filter

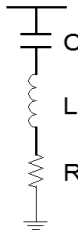
Single tuned filter ditala pada salah satu orde harmonisa (biasanya pada orde harmonisa rendah). Filter ini terdiri dari rangkaian seri kapasitor, reaktor dan resistor (RLC) seperti yang terlihat pada Gambar 2.13. Rangkaian filter ini mempunyai impedansi yang rendah pada frekuensi resonansinya. Sebuah shunt filter dikatakan ditala pada sebuah frekuensi, jika pada frekuensi tersebut reaktansi induktif dan kapasitifnya sama dengan nol ( $X_L = X_C$ ). Kualitas sebuah filter ( $Q$ ) ditentukan dari ketajaman pada penalaannya. Filter dengan  $Q$  yang tinggi ditala secara tajam pada satu frekuensi harmonisa yang rendah

(contohnya orde 5) dan nilai Q yang umum untuk filter jenis ini antara 30 dan 60.

Faktor kualitas (Q) filter merupakan perbandingan antara induktansi (atau kapasitansi) pada saat resonansi dengan besarnya resistansi.

$$Q = \frac{X_0}{R} \quad (2.14)$$

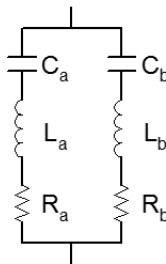
Dimana  $X_L = X_C = X_0$  pada keadaan resonansi



**Gambar 2.13** Rangkaian Single Tuned Filter

#### 2.14.2. Double Tuned Filter

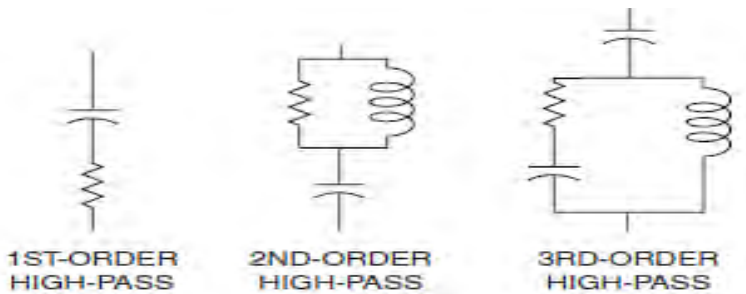
Double tuned filter merupakan gabungan dari dua buah single tuned filter. Rangkaian filter penalaan ganda dapat dilihat pada Gambar 2.14. Double Tuned Filter dapat ditala pada 2 buah orde harmonisa.



**Gambar 2.14** Rangkaian Double Tuned Filter

#### 2.14.3. High Pass Damped Filter

Ada empat jenis dari high pass damped filter seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.15 yaitu damped filter orde satu, orde dua, orde tiga dan jenis damped filter tipe C.



**Gambar 2.15** Rangkaian High Pass Damped Filter

1. Filter orde satu tidak biasa digunakan, jenis ini akan memerlukan kapasitor yang besar dan akan terjadi kerugian daya yang berlebihan pada frekuensi dasarnya.
2. Filter orde dua memiliki kinerja yang baik tetapi rugi-rugi yang lebih besar pada frekuensi fundamental dibandingkan dengan filter damped orde tiga.
3. Filter orde tiga mempunyai keunggulan dibanding filter damped orde dua yaitu mampu mengurangi rugi-rugi pada frekuensi fundamental yang disebabkan oleh naiknya impedansi pada frekuensi tersebut karena kehadiran  $C_2$ . Apalagi rating dari  $C_2$  adalah sangat kecil dibandingkan dengan kapasitor  $C_1$ .
4. Kelebihan filter damped jenis C adalah mampu mengurangi rugi-rugi yang besar pada frekuensi fundamental ketika  $C_2$  dan  $L$  ditala secara seri pada frekuensi tersebut. Filter ini lebih mudah terpengaruh penyimpangan frekuensi fundamental dan pergeseran nilai komponen.

*Halaman ini Sengaja Dikosongkan*

### **BAB III**

## **SISTEM KELISTRIKAN PT. SEMEN INDONESIA PABRIK ACEH**

### **3.1. Sistem Kelistrikan PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh**

PT. Semen Indonesia adalah perusahaan yang bergerak di bidang industri produksi semen. PT. Semen Indonesia telah berkembang pesat dan saat ini telah mengembangkan perusahaannya dengan membangun pabrik-pabrik baru di beberapa wilayah di Indonesia salah satunya adalah Aceh. Sistem kelistrikan di Pabrik Aceh ini berada dalam masa perencanaan dan direncanakan dapat menanggung beban kurang lebih 45 MVA dengan menggunakan sumber listrik dari PLN pada tegangan 150 KV. Tabel 3.1 menunjukkan besarnya daya yang disuplai PLN untuk PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh.

**Tabel 3.1** Daya Suplai PLN pada PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh

ID	Tipe	Rated KV	MVA
PLN	Power Grid	150	45

Pabrik ini menggunakan 2 jenis transformator yaitu transformator 3 belitan dan transformator 2 belitan. Transformator 3 belitan digunakan untuk memberi suplai pada beban-beban motor khusus yang mempunyai tipikal yang sama dan untuk menurunkan tegangan 150 KV dari PLN menjadi 6,3 KV, sedangkan trafo 2 belitan digunakan untuk memberikan suplai pada beban-beban motor dan lump. Data transformator 3 belitan dapat dilihat pada Tabel 3.2 dan data transformator 2 belitan dapat dilihat pada Tabel 3.3 dan Tabel 3.4.

Sistem kelistrikan di PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh terbagi atas beban-beban yang dikelompokkan dalam 13 *Electrical Room* (ER) sesuai dengan proses produksi pabrik Semen tersebut. Pembagian ER tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.5. Setiap ER memiliki beban-beban listrik berupa motor induksi, motor induksi dengan VFD, dan lump. Pembebanan di tiap ER tidaklah merata, karena pada setiap tahap produksi semen membutuhkan beban kelistrikan yang berbeda-beda.

**Tabel 3.2** Data Transformator 3 Belitan

ID	Winding	MVA	kV	Z (%)	X/R	Hubungan
811TX01	Primary	30	150	12,5	30	Y
	Secondary	30	6,3	12,5	30	Y
	Tertiary	5	6,3	12,5	30	D
811TX02	Primary	30	150	12,5	30	Y
	Secondary	30	6,3	12,5	30	Y
	Tertiary	5	6,3	12,5	30	D
811TX03	Primary	30	150	12,5	30	Y
	Secondary	30	6,3	12,5	30	Y
	Tertiary	5	6,3	12,5	30	D
441KL01TM1	Primary	2,5	6,3	7	7	D
	Secondary	1,5	0,7	7	7	Y
	Tertiary	1,5	0,7	7	7	D
831TM07.2	Primary	5,3	6,3	7	7	D
	Secondary	1,75	0,7	7	7	Y
	Tertiary	1,75	0,7	7	7	D

**Tabel 3.3** Data Transformator 2 Belitan

ID	MVA	Prim. kV	Sec. kV	% Z	X/R	Hubungan
821TM01	1	6,3	0,4	7	4,7	D/Y
831TM01.1	2,5	6,3	0,4	7	10,67	D/Y
831TM02.1	2,5	6,3	0,4	7	10,67	D/Y
321RR 01	0,63	6,3	0,4	7	7,1	D/Y
831TM03.1	2,5	6,3	0,4	7	7,1	D/Y
831TM04.1	3	6,3	0,4	7	10,67	D/Y
341SR01TM1	0,63	6,3	0,7	7	4,7	D/Y
341FN06TM1	3,818	6,3	1,835	7	10,67	D/Y
831TM053	2,5	6,3	0,4	7	10,67	D/Y



**Tabel 3.4** Data Transformator 2 Belitan (Lanjutan)

ID	MVA	Prim. kV	Sec. kV	% Z	X/R	Hubungan
441FN01TM1	3,818	6,3	1,835	7	10,67	D/Y
831TM052	3	6,3	0,4	7	10,67	D/Y
441FN02TM1	3,818	6,3	1,835	7	10,67	D/Y
831TM051	2,5	6,3	0,4	7	7,098	D/Y
831TM054	2,5	6,3	0,4	7	10,67	D/Y
471FN03TM1	0,63	6,3	0,7	7	5,79	D/Y
831TM06.1	1,6	6,3	0,4	7	10,67	D/Y
441FN19TM1	0,6	6,3	0,7	7	3,96	D/Y
831TM07.1	2,5	6,3	0,4	7	10,67	D/Y
441FN18TM1	1	6,3	0,7	7	5,79	D/Y
831TM08.1	2,5	6,3	0,4	7	7,098	D/Y
541SR01TM1	0,5	6,3	0,7	7	4,7	D/Y
541FN05TM1	3,818	6,3	1,835	7	11,41	D/Y
831TM08.2	2,5	6,3	0,4	7	7,1	D/Y
542SR01TM1	0,5	6,3	0,725	7	4,7	D/Y
542FN05TM1	3,818	6,3	1,835	7	11,41	D/Y
831TM09.1	1,6	6,3	0,4	7	10,67	D/Y
831TM10.1	2,5	6,3	0,4	7	7,1	D/Y
831TM11.1	2,5	6,3	0,4	7	7,1	D/Y
831TM12.1	1,6	6,3	0,4	7	7,1	D/Y
831TM12.2	2,5	6,3	0,4	7	7,1	D/Y
831TM13.1	2,5	6,3	0,4	7	7,1	D/Y

### 3.2. Beban Listrik pada PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh

Pada pabrik ini menggunakan motor-motor listrik jenis motor induksi yang dapat dilihat pada Tabel 3.7. Motor-motor ini sangat berperan penting dalam proses produksi semen, contohnya motor pada ER raw mill berfungsi untuk memutar mill kemudian ada beberapa motor yang digunakan untuk memutar konveyor. Beberapa motor ini perlu diatur kecepatan putarannya, oleh karena itu beberapa motor menggunakan VFD (*Variable Frequency Drive*). Selain itu terdapat beberapa motor induksi yang dipasang kapasitor bank dan reaktor yang

berfungsi untuk perbaikan faktor daya. Data kapasitor bank dan reaktor yang dipasang di motor dapat dilihat pada Tabel 3.6.

**Tabel 3.5** Electrical Room pada PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh

ER	ID
1	Limestone Crusher
2	Clay Crusher
3	Limestone Mix
4	Raw Mill
5	Kiln Preheater & Coal Mill
6	Coal Handling
7	Cooler
8	Finish Mill
9	Gypsum Trass
10	Packer
11	Utility
12	Office
13	Jetty

**Tabel 3.6** Kapasitor Bank dan Reaktor pada motor

ID Motor	ID Kapasitor	Rating (kvar)	KV	ID Reaktor	Rating (A)
231CR01M01	231CR01C1	427	6,3	X19	69,8
231CR01M02	231CR01C2	427	6,3	X20	69,8
341RM01M01	341RM01C01	1655	6,3	X9	147,2
341FN03M01	341FN03C01	150	6,3	X31	31,1
341FN02M01	341FN02C01	3092	6,3	X13	288,9
471FN02M01	471FN02C01	530	6,3	X15	69,8
471RM01M01	471RM01C01	320	6,3	X17	31,1
541FN09M01	541FN09C01	150	6,3	X34	31,1
541RM01M01	541RM01C01	1732	6,3	X22	147,2
542RM01M01	542RM01C01	1732	6,3	X23	147,2
542FN09M01	542FN09C01	150	6,3	X33	31,1

**Tabel 3.7** Data Beban Motor Induksi

ER	ID	Rating (kW)	Tegangan (kV)
1	231CR01M01	1200	6,3
	231CR01M02	1200	6,3
	241 BC01 M01	127	0,4
2	241 BC01 M04	37	0,4
4	341RM01M01	5350	6,3
	341FN03M01	450	6,3
	341FN02M01	7100	6,3
5	341SR01M01	365	0,7
	341FN03M01	2850	1,835
	441FN01M01	2700	1,92
	441KL01M01	800	0,7
	441KL01M02	800	0,7
	441FN02M01	2700	1,92
	471FN02M01	1700	6,3
	471FN03M01	400	0,7
	471RM01M01	950	6,3
	241 BC01 M08	37	0,4
7	441FN19M01	380	0,7
	441FN6-10M01	1370	0,7
	441FN11-16M01	1360	0,7
	441FN18M01	600	0,7
	541FN09M01	450	6,3
8	541RM01M01	5600	6,3
	541SR01M01	355	0,7
	541FN05M01	2800	1,92
	241 BC01 M06	11	0,4
	542RM01M01	5600	6,3
	542SR01M01	355	0,7
	542FN09M01	450	6,3
	542FN05M01	2800	1,92
	241 BC01 M07	11	0,4

### 3.3.Sumber Harmonisa PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh

Pada umumnya sumber harmonisa pada sebuah pabrik adalah beban non-linear. Seperti yang dijelaskan pada sub bab sebelumnya bahwa beberapa motor di pabrik ini menggunakan VFD sebagai pengatur kecepatan, sehingga VFD inilah yang menjadi sumber utama harmonisa pada PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh. Selain digunakan untuk mengatur kecepatan putaran motor VFD juga berfungsi untuk mengatasi arus starting motor yang nilainya terlalu tinggi. VFD menggunakan komponen elektronika daya yang dapat mengatur variasi frekuensi input ke motor induksi, sehingga putaran motor induksi dapat berubah-ubah. Data VFD yang digunakan pada pabrik ini dapat dilihat pada Tabel 3.8

**Tabel 3.8** Data VFD (Variable Frequency Drive)

Bus ID	Device ID	Tipe
831.LV01.1	241-BC01MO1-VD1-1-1	Arus
831.LV02.1	241-BC01MO1-VD1-3	Arus
831.MV04.1	341SR01-VD1	Arus
831.MV05.1	341FN06-VD1	Arus
831.MV05.1	441FN01-VD1	Arus
831.MV05.1	441KL1-VD1	Arus
831.MV05.1	441KL1-VD2	Arus
831.MV05.1	441FN02-VD1	Arus
831.MV05.2	471FN03-VD1	Arus
831.LV06.1	241-BC01MO1-VD1-9	Arus
831.MV07.1	441FN19-VD1	Arus
831.MV07.1	441.FN6-10-VD1	Arus
831.MV07.1	441.FN11-16-VD1	Arus
831.MV07.1	441FN.18-VD1	Arus
831.MV08.1	541SR01-VD1	Arus
831.MV08.1	541FN09-VD1	Arus
831.LV08.1	241-BC01MO1-VD1-7	Arus
831.MV08.2	542SR01-VD1	Arus
831.MV08.2	542FN09-VD1	Arus
831.LV08.2	241-BC01MO1-VD1-8	Arus

Setiap VFD yang digunakan menghasilkan harmonisa arus yang berbeda-beda tergantung pada jenis VFD tersebut.

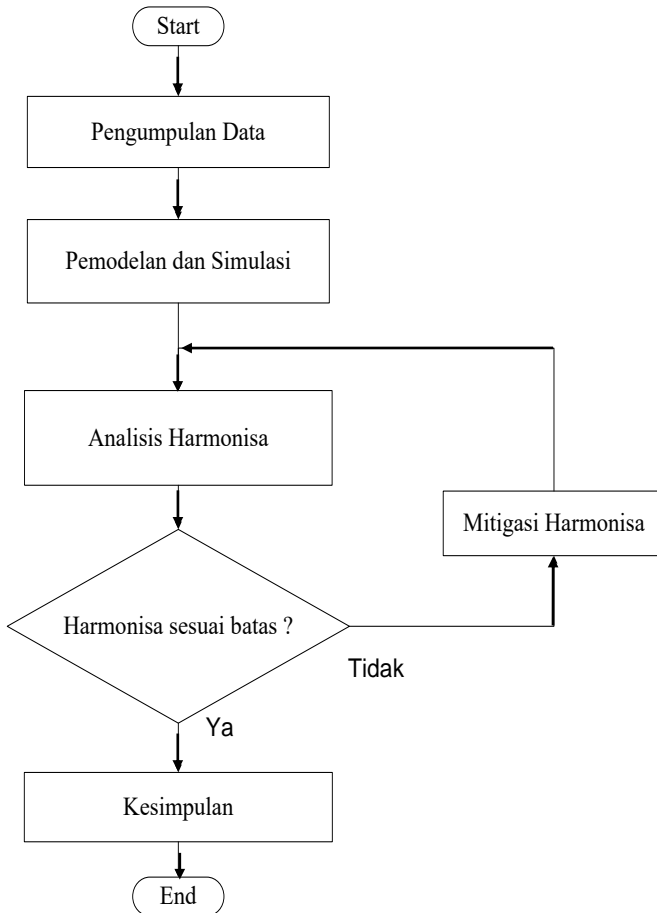
### **3.4.Langkah-Langkah Peredaman Harmonisa pada PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh**

Tujuan yang ingin dicapai dari tugas akhir ini adalah mempelajari kondisi harmonisa pada sistem kelistrikan PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh dan melakukan mitigasi harmonisa. Studi analisis dilakukan dengan pemodelan dan simulasi menggunakan software ETAP 12.6. Sebelum melakukan pemodelan sistem, terlebih dahulu harus mengumpulkan data-data peralatan listrik yang digunakan di pabrik ini. Simulasi diawali dengan mengecek kondisi aliran daya pada sistem. Simulasi aliran daya dilakukan untuk mengecek nilai tegangan dan faktor daya pada tiap bus. Karena beban yang digunakan pada pabrik ini sebagian besar adalah motor induksi, maka faktor daya sistem nilainya rendah dan banyak bus yang nilai tegangannya dibawah rating atau *undervoltage*. Oleh karena itu perlu dilakukan perbaikan faktor daya sistem agar tidak terkena sanksi oleh PLN dengan cara memasang kapasitor bank. Kapasitor bank tidak hanya memperbaiki nilai faktor daya, akan tetapi dapat menaikan profil tegangan pada bus, sehingga bus yang tadinya *undervoltage* menjadi normal. Setelah pemasangan kapasitor bank, nilai faktor daya sistem dalam kondisi aman, terhindar dari sanksi PLN.

Kemudian dilakukan simulasi harmonisa untuk mengecek kondisi harmonisa setelah kapasitor bank dipasang. Beberapa bus nilai THD V nya melebihi batas standar, sehingga perlu dilakukan mitigasi harmonisa.

Mitigasi harmonisa dilakukan dengan mengganti seluruh kapasitor bank yang sebelumnya dipasang menjadi filter pasif single tuned. Filter single tuned dapat berfungsi sebagai peredam harmonisa dan sebagai kompensator daya reaktif. Parameter perancangan filter single tuned berdasarkan hasil analisis harmonisa, seperti nilai daya reaktif dan pada orde berapa filter dirancang.

Setelah itu dilakukan simulasi harmonisa ulang untuk mengecek nilai THD V pada bus yang sebelumnya nilai THD V nya melebihi batas standar yang diijinkan. Gambar 3.1 menunjukkan flowchart metodologi peredaman harmonisa pada sistem kelistrikan PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh.



**Gambar 3.1** Flowchart Metodologi Peredaman Harmonisa pada PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh.

Metodologi yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pengumpulan Data

Pengumpulan data-data sistem kelistrikan dan single line diagram dari PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh.

2. **Pemodelan dan Simulasi**  
Setelah semua data yang diperlukan untuk analisis harmonisa didapatkan, maka dilakukan pemodelan sistem dalam bentuk single line diagram menggunakan software ETAP 12.6. Kemudian dilakukan simulasi aliran daya dan harmonisa pada sistem.
3. **Analisis Harmonisa**  
Analisis harmonisa dilakukan untuk mengetahui nilai THD ( Total Harmonic Distortion ) pada sistem.
4. **Mitigasi Harmonisa**  
Mitigasi harmonisa dilakukan dengan pemasangan filter pasif single tuned. Hasil analisis harmonisa dapat digunakan sebagai acuan untuk merancang filter single tuned.
5. **Kesimpulan**  
Memberikan kesimpulan mengenai kondisi harmonisa pada sistem kelistrikan PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh setelah mitigasi harmonisa dilakukan.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

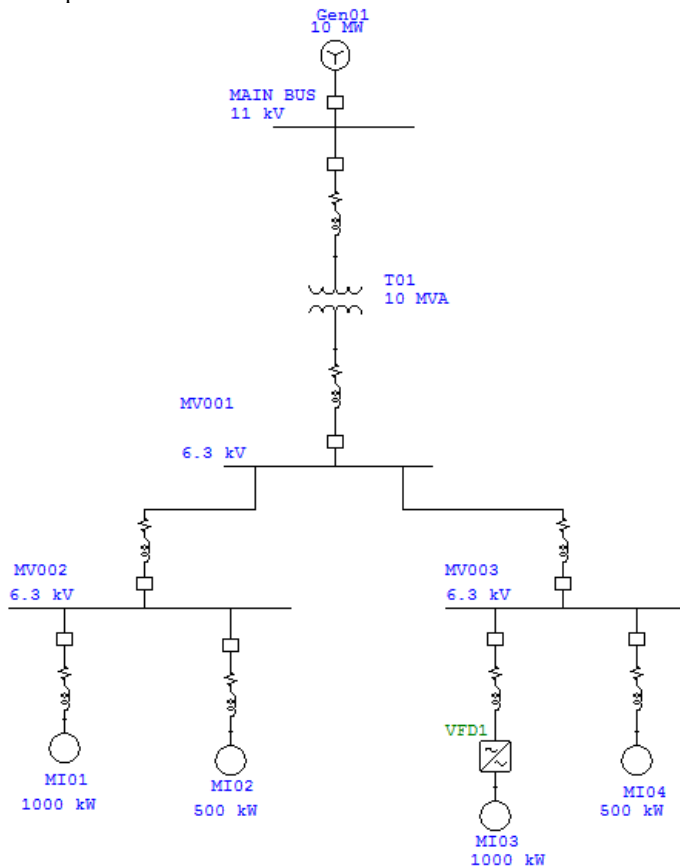


## BAB IV

### SIMULASI DAN ANALISIS

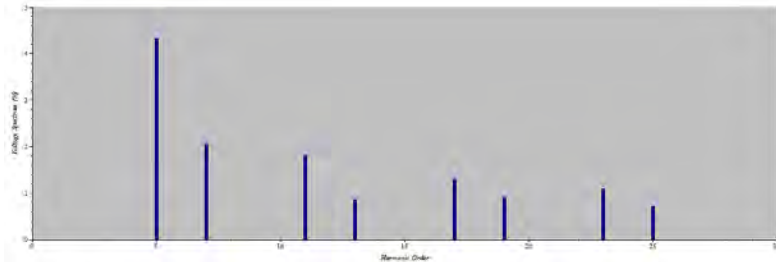
#### 4.1. Pengujian Filter Pasif Single Tuned

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kinerja filter pasif single tuned ketika dipasang pada suatu sistem kelistrikan. Pengujian dilakukan dengan cara simulasi menggunakan single line diagram sederhana yang dapat dilihat pada Gambar 4.1.

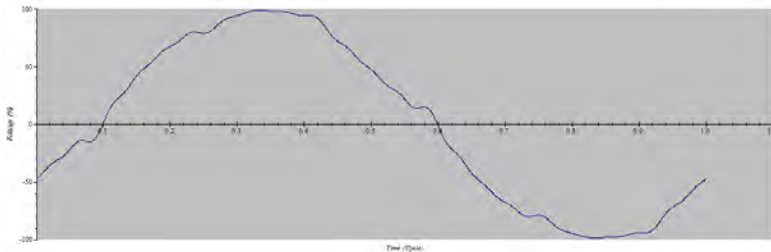


**Gambar 4.1** Single Line Diagram Uji Coba

Filter single tuned akan dipasang pada bus MV003 dimana pada bus tersebut terdapat motor induksi MI03 yang menggunakan VFD. Sebelum merancang filter single tuned, terlebih dahulu harus diketahui spektrum pada bus MV003 agar kita dapat menentukan pada orde berapa filter akan dirancang. Spektrum bus MV003 dapat dilihat pada Gambar 4.2. Gambar 4.3 menunjukkan bentuk gelombang pada Bus MV003 yang mengandung harmonisa, sehingga bentuknya tidak sinusoidal murni.



**Gambar 4.2** Spektrum Bus MV003



**Gambar 4.3** Bentuk Gelombang Tegangan Bus MV003

Dari gambar spektrum diketahui bahwa nilai IHD terbesar pada orde 5, sehingga filter single tuned akan dirancang pada orde 5. Sebelum merancang filter single tuned, terlebih dahulu kita harus menentukan nilai kVAR yang akan digunakan. Perhitungan nilai kVAR sama seperti perhitungan kVAR kapasitor bank yaitu dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

### **MV003**

Faktor Daya Awal = 97,1 %  
P (Daya aktif) = 1513 kW

Pemasangan kapasitor agar mencapai faktor daya 99%

$$\begin{aligned} Q1 &= 1513 \tan (\arccos 0,971) \\ &= 1513 \tan 13,83 \\ &= 372,47 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q2 &= 1513 \tan (\arccos 0,98) \\ &= 1513 \tan 8,11 \\ &= 215,60 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

Maka Qc yang dipilih untuk memperbaiki adalah

$$\begin{aligned} Qc &= Q1 - Q2 \\ &= 372,47 - 215,60 \\ &= 156,87 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

Dipasang kapasitor bank dengan nilai 150 kVAR dibus MV003.

Setelah kita mengetahui nilai kVAR yang akan digunakan, berikutnya kita akan merancang filter single tuned. Perancangan filter single tuned dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

**Single tuned orde 5, frekuensi tuning ( $\omega n$ ) = 250 Hz**

Kapasitor (C)

$$C = \frac{kVAR}{Vl - l^2 \times \omega 0} = \frac{150}{6,3^2 \times 2 \times 3,14 \times 50} = 12,03 \mu F$$

Induktor (L)

$$L = \frac{1}{\omega n^2 \times C} = \frac{1}{(2 \times 3,14 \times 250)^2 \times 12,03 \times 10^{-6}} = 33,69 \text{ mH}$$

$$XL = \omega 0 \times L = 2 \times 3,14 \times 50 \times 33,69 \times 10^{-3} = 10,58 \Omega$$

$$X0=XL=10,58 \Omega$$

Resistor (R)

$$R = \frac{X0}{Q} = \frac{10,58}{45} = 0,235 \Omega$$

Nilai Q untuk single tuned bernilai antara 30 sampai 60.

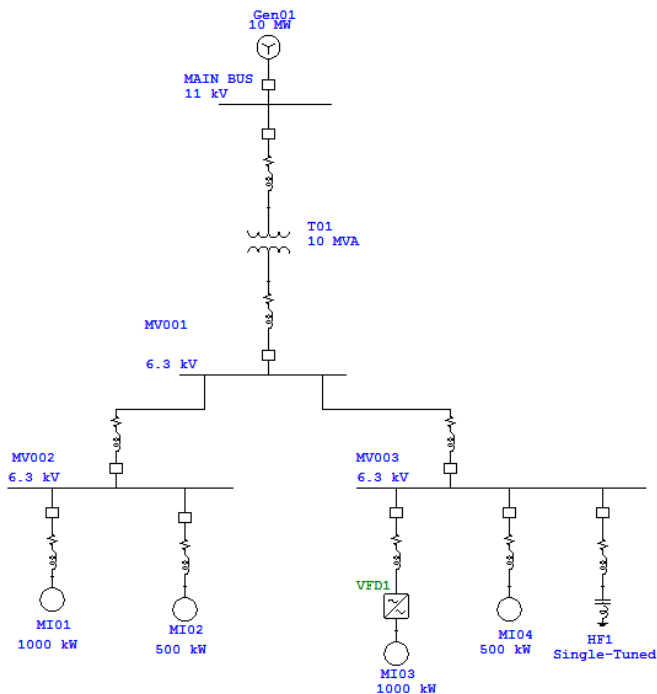
Setelah selesai merancang filter single tuned orde 5, maka filter tersebut dipasang pada bus MV003 seperti Gambar 4.4. Kemudian simulasi

harmonisa dilakukan untuk melihat nilai THD pada bus MV003. Hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.1.

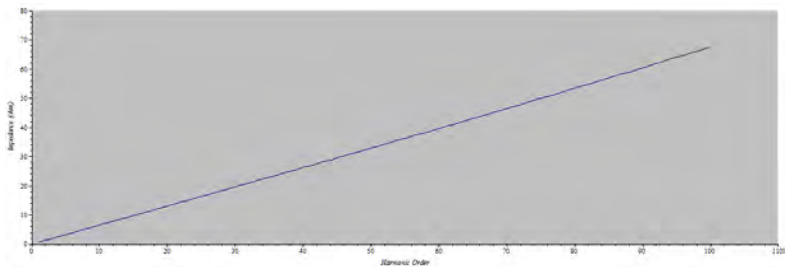
**Tabel 4.1** Hasil Simulasi Harmonisa Pengujian Filter Single Tuned

ID BUS	THD V (%)	THD V (%)
	Sebelum Pemasangan Filter	Setelah Pemasangan Filter
MV003	5,67	3,34

Untuk mengetahui apakah filter single tuned bekerja dengan baik sebagai peredam harmonisa, kita dapat melihat karakteristik kurva Z magnitude pada bus MV003 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6.

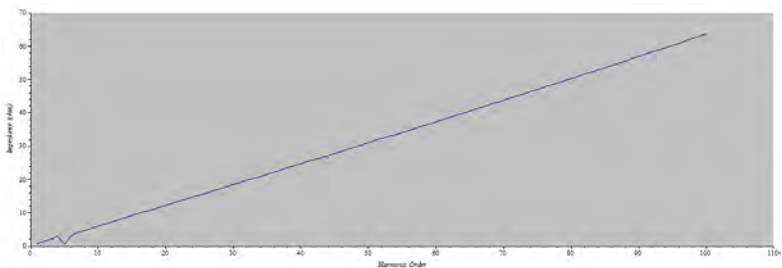


**Gambar 4.4** Filter Single Tuned Dipasang di Bus MV003



**Gambar 4.5** Kurva Z Magnitude Bus MV003 Sebelum Pemasangan Filter Single Tuned

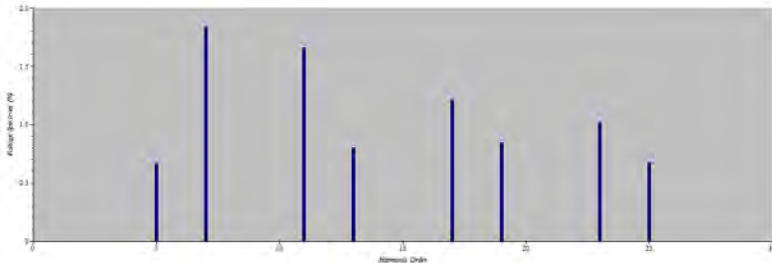
Sebelum filter single tuned dipasang, nilai impedansi bus MV003 linear terhadap orde harmonisa.



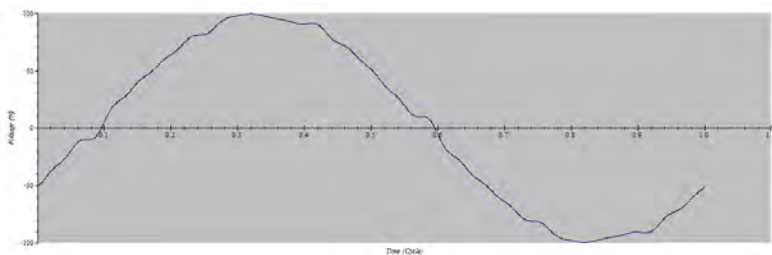
**Gambar 4.6** Kurva Z Magnitude Bus MV003 Setelah Pemasangan Filter Single Tuned

Setelah filter single tuned dipasang, terjadi perubahan bentuk kurva Z magnitude pada bus MV003. Terlihat pada saat kurva berada pada harmonisa orde 5, nilai impedansi mengalami penurunan. Hal tersebut membuktikan bahwa filter single tuned bekerja dengan baik pada orde 5. Pada orde 5 nilai impedansi menurun, kemudian arus harmonisa orde 5 akan mengalir masuk ke filter single tuned sehingga arus harmonisa pada bus MV003 berkurang atau dengan kata lain mengalami peredaman. Gambar 4.7 menunjukkan bahwa setelah filter dipasang, harmonisa pada orde 5 mengalami penurunan nilai. Untuk bentuk gelombang tegangan pada bus MV003 yang terlihat pada Gambar 4.8, bentuknya hampir menyerupai sinusoidal murni, meskipun masih ada sedikit cacat yang dikarenakan masih adanya beberapa harmonisa yang tersisa di orde yang lain yang tidak mengalami peredaman. Meskipun

masih ada harmonisa yang tersisa, tetapi jika nilai THD V nya setelah dipasang filter tidak melebihi batas standar yang diijinkan berarti bus MV003 termasuk dalam kategori aman.



**Gambar 4.7** Spektrum Bus MV003 Setelah Pemasangan Filter



**Gambar 4.8** Bentuk Gelombang Tegangan Bus MV003 Setelah Pemasangan Filter

Sebelum merancang sebuah filter, terlebih dahulu harus ditentukan besarnya nilai daya reaktif yang akan digunakan. Sebenarnya pa pengaruh nilai daya reaktif ini terhadap kinerja filter single tuned. Pengujian akan dilakukan untuk mengetahui pengaruh nilai daya reaktif ini. Filter single tuned akan dirancang kembali akan tetapi dengan nilai kVAR yang lebih rendah daripada sebelumnya.

**Single tuned orde 5, frekuensi tuning ( $\omega n$ ) = 250 Hz**

Kapasitor (C)

$$C = \frac{kVAR}{V_{l-l}^2 \times \omega_0} = \frac{75}{6,3^2 \times 2 \times 3,14 \times 50} = 6,01 \mu F$$

Induktor (L)

$$L = \frac{1}{\omega_n^2 \times C} = \frac{1}{(2 \times 3,14 \times 250)^2 \times 6,01 \times 10^{-6}} = 67,38 \text{ mH}$$

$$X_L = \omega_0 \times L = 2 \times 3,14 \times 50 \times 67,38 \times 10^{-3} = 21,17 \Omega$$

$$X_0 = X_L = 21,17 \Omega$$

Resistor (R)

$$R = \frac{X_0}{Q} = \frac{21,17}{45} = 0,470 \Omega$$

Hasil simulasi harmonisa setelah nilai daya reaktif (kVAR) filter diganti dapat dilihat pada Tabel 4.2.

**Tabel 4.2** Hasil Simulasi Pengujian Filter Single Tuned Setelah Nilai Daya Reaktif diganti.

ID BUS	THD V (%)	THD V (%)
	Sebelum Pemasangan Filter	Setelah Pemasangan Filter
MV003	4,07	3,65

Ternyata hasil peredaman harmonisa lebih buruk ketika nilai daya reaktifnya diperkecil. Maka dapat disimpulkan bahwa semakin besar nilai daya reaktif filter, semakin baik peredaman yang dilakukan. Tetapi perlu diingat bahwa nilai daya reaktif dapat mempengaruhi nilai tegangan pada bus tersebut. Jangan sampai bus mengalami overvoltage karena penggunaan daya reaktif yang berlebihan. Setelah melakukan pengujian filter single tuned, telah diketahui kemampuan filter ini untuk melakukan peredaman harmonisa pada salah satu orde harmonisa, sehingga mitigasi harmonisa yang akan digunakan pada sistem kelistrikan PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh adalah filter single tuned.

## 4.2. Simulasi Dan Analisa Aliran Daya Kondisi Awal Sistem Kelistrikan

Kondisi awal sistem kelistrikan di pabrik ini adalah saat semua beban terhubung ke sumber suplai dari PLN. Beban-bekan tersebut

meliputi motor induksi, VFD, lump, serta beberapa kapasitor dan reaktor yang terpasang pada beberapa motor induksi. Sebelum kita melakukan studi harmonisa pada pabrik ini, kita harus mengetahui kondisi aliran daya dari pabrik ini dengan melakukan simulasi. Simulasi aliran daya dilakukan untuk mengetahui nilai tegangan dan faktor daya di tiap bus. Hasil dari simulasi aliran daya tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan 4.4.

**Tabel 4.3** Hasil Simulasi Aliran Daya pada Bus 6,3 kV (MV) dan 150 kV Kondisi Awal Sistem Kelistrikan

Bus	Nominal kV	kV (%)	PF (%)
BUS PLN	150	100	70,6
821MV011	6,3	96,27	83,2
821MV021	6,3	92,09	75,2
821MV031	6,3	92,23	74,3
831MV012	6,3	94,94	78,0
831MV021	6,3	94,87	78,2
831MV031	6,3	95,27	76,9
831MV041	6,3	90,14	85,3
831MV051	6,3	89,75	68,8
831MV052	6,3	90,64	81,7
831MV061	6,3	89,41	78,5
831MV071	6,3	90,30	66,2
831MV081	6,3	91,14	73,8
831MV082	6,3	90,95	74,3
831MV091	6,3	88,56	77,1
831MV101	6,3	91,73	78,1
831MV111	6,3	91,57	77,9
831MV121	6,3	91,67	77,6
831MV131	6,3	91,39	79,2



**Tabel 4.4** Hasil Simulasi Aliran Daya pada Bus 0,4 kV (LV) Kondisi Awal Sistem Kelistrikan

Bus	Nominal kV	kV (%)	PF (%)
83ILV011	0,4	97,11	80,6
83ILV021	0,4	96,66	80,0
83ILV031	0,4	96,91	79,8
83ILV041	0,4	92,26	79,8
83ILV051	0,4	88,28	79,9
83ILV052	0,4	94,41	79,5
83ILV053	0,4	93,79	79,5
83ILV054	0,4	92,95	79,6
83ILV061	0,4	90,99	79,9
83ILV071	0,4	92,39	79,8
83ILV081	0,4	91,67	79,9
83ILV082	0,4	91,78	79,9
83ILV091	0,4	87,84	79,8
83ILV101	0,4	94,02	79,9
83ILV111	0,4	90,98	79,7
83ILV121	0,4	90,37	79,7
83ILV122	0,4	91,69	79,9
83ILV131	0,4	93,00	80,0

Setelah melihat hasil simulasi aliran daya pada kondisi awal sistem kelistrikan, diketahui bahwa banyak bus yang mengalami undervoltage dan nilai faktor dayanya rendah. Bahkan pada bus PLN, nilai faktor dayanya hanya 70.6 %, hal ini tidak boleh dibiarkan mengingat peraturan dari PLN yang akan memberikan penalti bagi perusahaan yang nilai faktor daya nya dibawah 85%. Oleh karena itu perlu dipasang kapasitor bank sebagai kompensator daya reaktif. Kapasitor bank juga dapat membantu memperbaiki nilai tegangan yang ada di bus, sehingga tidak mengalami undervoltage.

### 4.3. Perancangan kapasitor Bank

Sebelum melakukan pemasangan kapasitor bank, harus dilakukan perhitungan terlebih dahulu untuk mendapatkan nilai daya reaktif yang sesuai. Kapasitor bank akan diletakkan pada bus MV yang terdapat beban-beban motor induksi, karena pada bus tersebutlah yang nilai faktor dayanya kecil akibat beban motor yang bersifat induktif. Perhitungan nilai kapasitor bank adalah sebagai berikut:

#### 831MV012 (Limestone Crusher)

Faktor Daya Awal = 78,0 %

P (Daya aktif) = 1500 kW

Pemasangan kapasitor agar mencapai faktor daya 98%

$$Q1 = 1500 \tan (\arccos 0,78)$$

$$= 1500 \tan 38,74$$

$$= 1213 \text{ kVAR}$$

$$Q2 = 1500 \tan (\arccos 0,98)$$

$$= 1500 \tan 0,46$$

$$= 12 \text{ kVAR}$$

Maka Qc yang dipilih untuk memperbaiki adalah

$$Qc = Q1 - Q2$$

$$= 1213 - 12$$

$$= 1201 \text{ kVAR}$$

Dipasang kapasitor bank dengan nilai 1200 kVAR dibus 831MV012.

#### 831MV021 (Clay Crusher)

Faktor Daya Awal = 78,2 %

P (Daya aktif) = 977 kW

Pemasangan kapasitor agar mencapai faktor daya 95%

$$Q1 = 977 \tan (\arccos 0,782)$$

$$= 977 \tan 38,56$$

$$= 778,81 \text{ kVAR}$$

$$Q2 = 977 \tan (\arccos 0,95)$$

$$= 977 \tan 161,81$$

$$= - 321,03 \text{ kVAR}$$

Maka Qc yang dipilih untuk memperbaiki adalah

$$Qc = Q1 - Q2$$

$$= 778,81 - (- 321,03)$$

$$= 1099,84 \text{ kVAR}$$

Dipasang kapasitor bank dengan nilai 1200 kVAR di bus 831MV021.

**831MV041 (Raw Mill)**

Faktor Daya Awal = 85,8 %

P (Daya aktif) = 7652 kW

Pemasangan kapasitor agar mencapai faktor daya 98%

$$Q1 = 7652 \tan (\arccos 0,858)$$

$$= 7652 \tan 42,44$$

$$= 4581 \text{ kVAR}$$

$$Q2 = 7652 \tan (\arccos 0,98)$$

$$= 7652 \tan 23,23$$

$$= 3284 \text{ kVAR}$$

Maka  $Q_c$  yang dipilih untuk memperbaiki adalah

$$Q_c = Q1 - Q2$$

$$= 7652 - 3284$$

$$= 4368 \text{ kVAR}$$

Dipasang kapasitor bank dengan nilai 4350 kVAR di bus 831MV041.

**831MV051 (Kiln Preheater)**

Faktor Daya Awal = 68,8 %

P (Daya aktif) = 8684 kW

Pemasangan kapasitor agar mencapai faktor daya 85%

$$Q1 = 8684 \tan (\arccos 0,688)$$

$$= 8684 \tan 46,52$$

$$= 9148 \text{ kVAR}$$

$$Q2 = 8684 \tan (\arccos 0,85)$$

$$= 8684 \tan 31,79$$

$$= 2300 \text{ kVAR}$$

Maka  $Q_c$  yang dipilih untuk memperbaiki adalah

$$Q_c = Q1 - Q2$$

$$= 9148 - 5382$$

$$= 3766 \text{ kVAR}$$

Dipasang kapasitor bank dengan nilai 4000 kVAR di bus 831MV051.

**831MV052 (Coal Mill)**

Faktor Daya Awal = 82,1 %

P (Daya aktif) = 3005 kW

Pemasangan kapasitor agar mencapai faktor daya 99%

$$Q1 = 3005 \tan (\arccos 0,738)$$

$$= 3005 \tan 34,81$$

$$= 2089 \text{ kVAR}$$

$$\begin{aligned} Q2 &= 3005 \tan (\arccos 0,99) \\ &= 3005 \tan 171,89 \\ &= -428 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

Maka  $Q_c$  yang dipilih untuk memperbaiki adalah

$$\begin{aligned} Q_c &= Q1 - Q2 \\ &= 2089 - (-428) \\ &= 2517 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

Dipasang kapasitor bank dengan nilai 2700 kVAR di bus 831MV052.

### **831MV071 (Cooler)**

$$\begin{aligned} \text{Faktor Daya Awal} &= 66,3 \% \\ P (\text{Daya aktif}) &= 3141 \text{ kW} \end{aligned}$$

Pemasangan kapasitor agar mencapai faktor daya 99%

$$\begin{aligned} Q1 &= 3141 \tan (\arccos 0,663) \\ &= 3141 \tan 48,47 \\ &= 3545 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q2 &= 3141 \tan (\arccos 0,99) \\ &= 3141 \tan 171,89 \\ &= -447 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

Maka  $Q_c$  yang dipilih untuk memperbaiki adalah

$$\begin{aligned} Q_c &= Q1 - Q2 \\ &= 3545 - (-447) \\ &= 3992 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

Dipasang kapasitor bank dengan nilai 4000 kVAR di bus 831MV071.

### **831MV081 (Finish Mill 1)**

$$\begin{aligned} \text{Faktor Daya Awal} &= 73,8 \% \\ P (\text{Daya aktif}) &= 5924 \text{ kW} \end{aligned}$$

Pemasangan kapasitor agar mencapai faktor daya 97%

$$\begin{aligned} Q1 &= 5924 \tan (\arccos 0,738) \\ &= 5924 \tan 42,44 \\ &= 5411 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q2 &= 5924 \tan (\arccos 0,97) \\ &= 5924 \tan 13,3 \\ &= 1400 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

Maka  $Q_c$  yang dipilih untuk memperbaiki adalah

$$\begin{aligned} Q_c &= Q1 - Q2 \\ &= 5411 - 1400 \\ &= 4011 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

Dipasang kapasitor bank dengan nilai 4000 kVAR di bus 831MV081.

#### **831MV082 (Finish Mill 2)**

Faktor Daya Awal = 74,6 %

P (Daya aktif) = 7007 kW

Pemasangan kapasitor agar mencapai faktor daya 95%

Q1 =  $7007 \tan (\arccos 0,746)$

=  $7007 \tan 42$

= 6249 kVAR

Q2 =  $7007 \tan (\arccos 0,95)$

=  $7007 \tan 18,18$

= 2301 kVAR

Maka Qc yang dipilih untuk memperbaiki adalah

Qc = Q1 – Q2

= 6249 – 2301

= 3948 kVAR

Dipasang kapasitor bank dengan nilai 4000 kVAR di bus 831MV082.

Lokasi penempatan dan nilai daya reaktif dari Kapasitor bank yang akan dipasang dapat dilihat pada Tabel 4.5.

**Tabel 4.5** Kapasitor Bank pada Sistem

Bus	Daya Reaktif (kVAR)
Bus 831MV012	1200
Bus 831MV021	1200
Bus 831MV041	4350
Bus 831MV051	4000
Bus 831MV052	2700
Bus 831MV071	4000
Bus 831MV081	4000
Bus 831MV082	4000

#### **4.4. Simulasi Dan Analisa Aliran Daya Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Kapasitor Bank**

Setelah didapat nilai daya reaktif kapasitor bank, maka akan dilakukan simulasi aliran daya lagi untuk mengetahui kondisi sistem. Hasil Simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.6 sampai 4.8.

**Tabel 4.6** Hasil Simulasi Aliran Daya pada Bus 6,3 kV (MV) dan 150 kV Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Kapasitor Bank

Bus	Nominal kV	kV (%)	PF (%)
BUS PLN	150	100	94,1
821MV011	6,3	99,50	100
821MV021	6,3	97,74	93,4
821MV031	6,3	96,03	94,5
831MV012	6,3	98,96	-100
831MV021	6,3	98,84	-92,6
831MV031	6,3	98,53	77
831MV041	6,3	95,26	99,9
831MV051	6,3	96,14	85,4
831MV052	6,3	97,22	-98,4
831MV061	6,3	96,08	78,7
831MV071	6,3	97,25	-99,6
831MV081	6,3	95,43	96,6
831MV082	6,3	95,25	94,2
831MV091	6,3	92,79	77,4
831MV101	6,3	95,55	78,2
831MV111	6,3	97,24	78,2
831MV121	6,3	97,34	77,9
831MV131	6,3	97,07	79,4

**Tabel 4.7** Hasil Simulasi Aliran Daya pada Bus 0,4 kV (LV) Kondisi Awal Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Kapasitor Bank

Bus	Nominal kV	kV (%)	PF (%)
831LV011	0,4	101,65	80,6
831LV021	0,4	101,17	80,0
831LV031	0,4	100,44	79,8

**Tabel 4.8** Hasil Simulasi Aliran Daya pada Bus 0,4 kV (LV) Kondisi Awal Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Kapasitor Bank (Lanjutan)

Bus	Nominal kV	kV (%)	PF (%)
831LV041	0,4	98,05	79,8
831LV051	0,4	95,42	79,9
831LV052	0,4	101,80	79,6
831LV053	0,4	101,23	79,6
831LV054	0,4	100,40	79,7
831LV061	0,4	98,23	79,9
831LV071	0,4	100,21	79,9
831LV081	0,4	96,61	79,9
831LV082	0,4	96,72	79,9
831LV091	0,4	92,75	79,8
831LV101	0,4	98,15	79,9
831LV111	0,4	97,27	79,8
831LV121	0,4	96,72	79,7
831LV122	0,4	97,94	79,9
831LV131	0,4	99,15	80,0

Dari hasil simulasi dapat diketahui bahwa pemasangan kapasitor bank sangat berguna dalam memperbaiki nilai faktor daya pada bus PLN menjadi 94.1 %, sehingga PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh tidak perlu khawatir terkena penalti dari PLN. Pemasangan Kapasitor bank juga meningkatkan tegangan di beberapa bus yang pada kondisi awalnya *undervoltage* menjadi tidak *undervoltage*.

#### **4.5. Simulasi Dan Analisa Harmonisa Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Kapasitor Bank**

Setelah kita mengetahui aliran daya sistem kelistrikan di pabrik aceh, saatnya kita mengetahui bagaimana kondisi harmonisa di sistem ini lewat simulasi harmonisa pada software

ETAP 12.6. Pada analisis harmonisa, terdapat nilai standar THD V dan TDD yang dapat dilihat pada IEEE. Standar nilai THD V dan TDD berbeda-beda untuk tiap bus. Untuk mengetahui nilai standar TDD, harus diketahui perbandingan antara nilai arus short circuit maksimal dengan arus yang mengalir pada bus ( $I_{sc}/I_L$ ). Nilai arus short circuit maksimum diperoleh dari simulasi short circuit pada ETAP 12.6, sedangkan arus yang mengalir pada bus diperoleh dari simulasi aliran daya. Hasil perhitungan  $I_{sc}/I_L$  dapat dilihat pada Tabel 4.9 dan Tabel 4.10. Hasil simulasi harmonisa dapat dilihat pada Tabel 4.11 sampai 4.14.

**Tabel 4.9** Standar Nilai TDD Bus 6,3 kV (MV)

Bus	$I_{sc}$ (kA)	$I_L$	$I_{sc}/I_L$	Standar TDD (%)
BUS PLN	12,703	346,5	36,6	8
821MV011	29,814	2749	10,8	5
821MV021	26,675	2749	9,7	5
821MV031	31,669	2749	11,5	5
831MV012	11,176	501,7	22,27	8
831MV021	7,554	229,1	33,0	8
831MV031	6,731	286,8	23,5	8
831MV041	18,662	1819,1	10,3	5
831MV051	18,979	2011,9	9,4	5
831MV052	15,145	589,7	25,7	8
831MV061	5,197	146,6	35,5	8
831MV071	14,125	861,4	16,4	5
831MV081	24,914	1346,0	18,5	5
831MV082	25,270	1492,6	16,9	5
831MV091	5,489	146,6	37,4	8
831MV101	15,392	229,1	67,2	12
831MV111	13,611	229,1	59,4	12
831MV121	18,951	375,7	50,4	12
831MV131	7,937	229,1	34,6	8



**Tabel 4.10** Standar Nilai TDD Bus 0,4 kV (LV)

Bus	I <sub>sc</sub> (kA)	I <sub>L</sub>	I <sub>sc</sub> /I <sub>L</sub>	Standar TDD (%)
831LV011	31,061	3608	8,6	5
831LV021	37,380	3608	10,4	5
831LV031	28,157	3608	7,8	5
831LV041	41,595	4330	9,6	5
831LV051	40,763	3608	11,3	5
831LV052	38,719	4330	8,9	5
831LV053	36,015	3608	10,0	5
831LV054	36,546	3608	10,1	5
831LV061	33,131	2309	14,3	5
831LV071	42,238	3608	11,7	5
831LV081	46,640	3608	12,9	5
831LV082	45,430	3608	12,6	5
831LV091	42,661	2309	18,5	5
831LV101	40,565	3608	11,2	5
831LV111	37,736	3608	10,5	5
831LV121	31,372	2887	10,9	5
831LV122	39,601	3608	11,0	5
831LV131	33,434	3608	9,3	5

**Tabel 4.11** Hasil Simulasi harmonisa pada Bus 6,3 kV (MV) dan 150 kV Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Kapasitor Bank

Bus	THD V (%)	Standar IEEE	THD I (%)	Standar IEEE
		THD V (%)		TDD (%)
BUS PLN	0,19	2,5	1,04	8
821MV011	0,38	5	1,26	5
821MV021	2,41	5	1,27	5
821MV031	2,18	5	3,19	5
831MV012	0,90	5	10,77	8
831MV021	0,56	5	4,96	8

**Tabel 4.12** Hasil Simulasi harmonisa pada Bus 6,3 kV (MV) dan 150 kV Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Kapasitor Bank (Lanjutan)

Bus	THD V (%)	Standar IEEE	THD I (%)	Standar IEEE
		THD V (%)		TDD (%)
831MV031	0,38	5	0,26	8
831MV041	0,38	5	0,71	5
831MV051	6,43	5	13,67	5
831MV052	10,38	5	78,13	8
831MV061	10,36	5	6,23	8
831MV071	2,30	5	22,29	5
831MV081	2,44	5	3,72	5
831MV082	2,44	5	3,12	5
831MV091	2,44	5	1,35	8
831MV101	2,18	5	1,33	12
831MV111	2,40	5	1,21	12
831MV121	2,40	5	1,23	12
831MV131	2,40	5	1,46	8

**Tabel 4.13** Hasil Simulasi Harmonisa pada Bus 0,4 kV (LV) Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Kapasitor Bank

Bus	THD V (%)	Standar IEEE	THD I (%)	Standar IEEE
		THD V (%)		TDD (%)
831LV011	3,04	5	9,42	5
831LV021	0,92	5	1,98	5
831LV031	0,37	5	0,27	5
831LV041	0,35	5	0,24	5
831LV051	5,43	5	3,23	5
831LV052	5,21	5	3,16	5
831LV053	4,99	5	2,99	5

**Tabel 4.14** Hasil Simulasi Harmonisa pada Bus 0,4 kV (LV) Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Kapasitor Bank (Lanjutan)

Bus	THD V (%)	Standar IEEE	THD I (%)	Standar IEEE
	THD V (%)			TDD (%)
831LV054	8,81	5	5,53	5
831LV061	9,21	5	6,33	5
831LV071	2,00	5	1,33	5
831LV081	2,26	5	1,27	5
831LV082	2,26	5	1,26	5
831LV091	2,27	5	1,36	5
831LV101	2,02	5	1,37	5
831LV111	2,06	5	1,24	5
831LV121	1,96	5	1,16	5
831LV122	2,09	5	1,34	5
831LV131	2,23	5	1,50	5

Dari hasil simulasi harmonisa dapat dilihat bahwa nilai THD V pada Bus 831MV051, 831MV052, 831MV061, 831LV051, 831LV052, 831LV054, dan 831LV061 melebihi batas standar yang diijinkan. Oleh karena itu harus dilakukan mitigasi harmonisa.

#### 4.6. Perancangan Filter Pasif Single Tuned

Pada tugas akhir ini mitigasi harmonisa sistem kelistrikan PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh akan dilakukan dengan pemasangan filter pasif single tuned yang dipilih karena kemampuannya yang handal dalam meredam harmonisa.

Pada buku karangan Roger C Dugan yang berjudul Electrical Power System Quality disebutkan bahwa studi harmonisa dilakukan salah satunya pada saat ingin melakukan pergantian kompensator daya reaktif yang awalnya menggunakan kapasitor bank menjadi menggunakan filter harmonisa. Hal tersebut dilakukan karena filter harmonisa bisa digunakan sebagai kompensator daya reaktif dan peredam harmonisa. Sehingga

kapasitor bank yang terletak pada bus MV (6,3 kV) akan diganti menjadi filter pasif single tuned. Untuk kapasitor bank yang terletak pada bus motor induksi yang digunakan untuk memperbaiki faktor daya motor induksi tetap digunakan. Perhitungan filter pasif single tuned menggunakan rumus sebagai berikut :

Kapasitor (C)

$$C = \frac{kVAR}{V_{l-l}^2 \times \omega_0}$$

Induktor (L)

$$L = \frac{1}{\omega n^2 \times C}$$

$$XL = \omega 0 \times L$$

$$XL = XC = X0$$

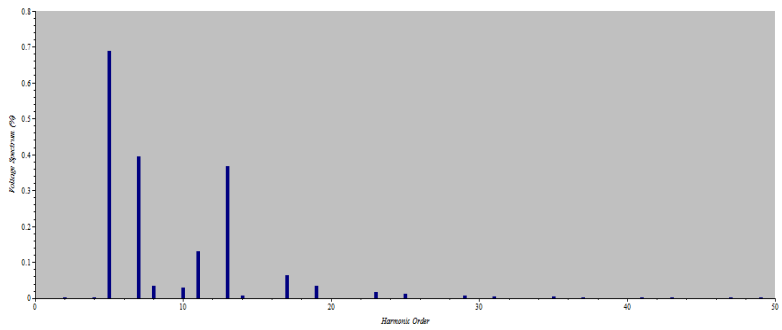
$\omega n$  menggunakan frekuensi resonansi

Resistor (R)

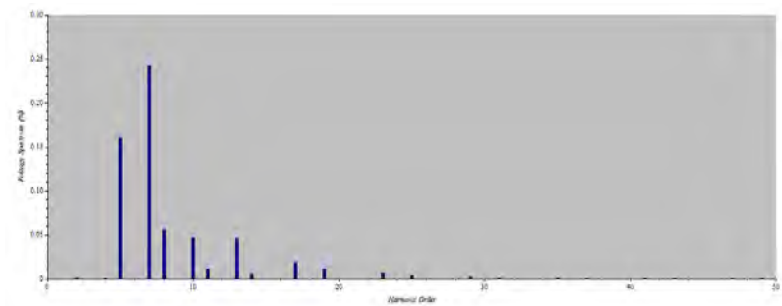
$$R = \frac{X0}{Q}$$

Dimana nilai Q standarnya adalah 30-60 untuk filter single tuned

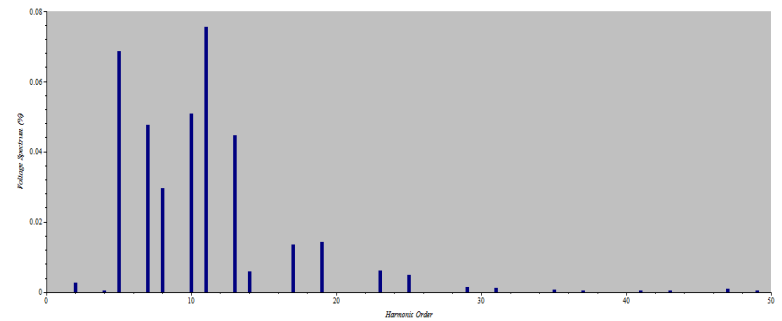
Sebelum melakukan perhitungan nilai komponen filter, terlebih dahulu kita harus mengetahui bentuk spektrum harmonisa pada bus yang akan dipasang filter. Hal tersebut dilakukan agar kita dapat mengetahui pada orde berapa nilai harmonisa harus ditekan Gambar 4.9 sampai Gambar 4.16 menunjukkan spektrum harmonisa pada bus yang akan dipasang filter.



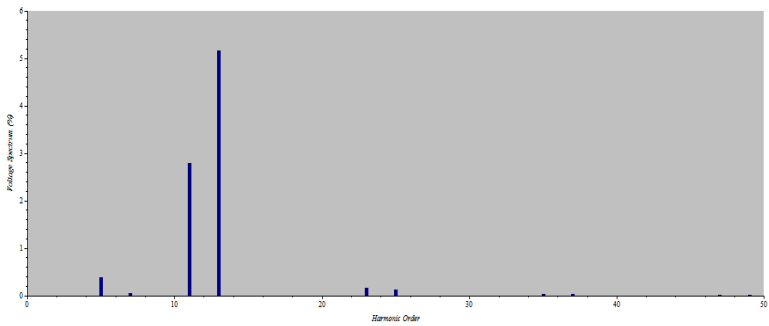
**Gambar 4.9** Spektrum Harmonisa di Bus 831MV012



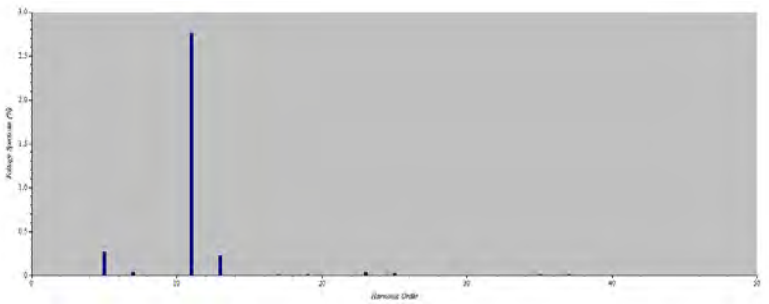
**Gambar 4.10** Spektrum Harmonisa di Bus 831MV021



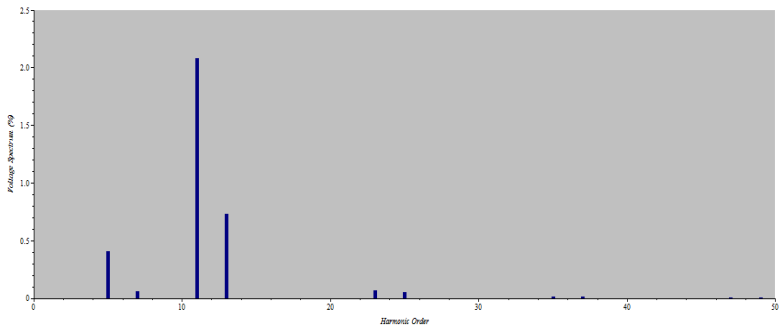
**Gambar 4.11** Spektrum Harmonisa di Bus 831MV041



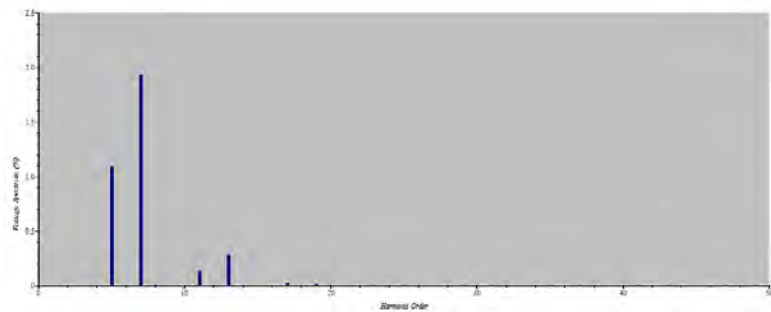
**Gambar 4.12** Spektrum Harmonisa di Bus 831MV051



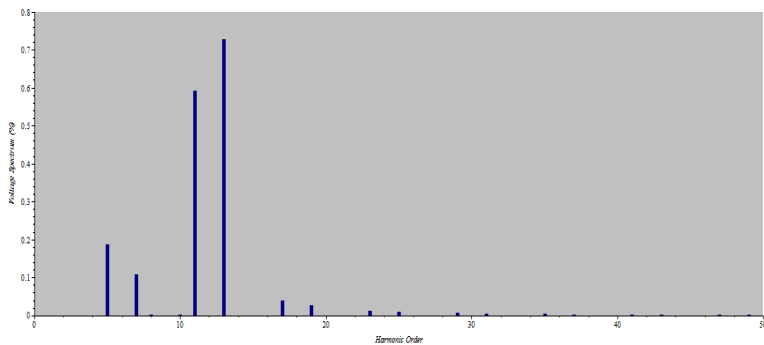
**Gambar 4.13** Spektrum Harmonisa di Bus 831MV052



**Gambar 4.14** Spektrum Harmonisa di Bus 831MV071



**Gambar 4.15** Spektrum Harmonisa di Bus 831MV081



**Gambar 4.16** Spektrum Harmonisa di Bus 831MV082

**Design filter Bus 831MV012 (Limestone Crusher)**

**Single tuned orde 5, frekuensi tuning ( $\omega_n$ ) = 250 Hz**

**Kapasitor (C)**

$$C = \frac{kVAR}{V_{l-l}^2 \times \omega_0} = \frac{1200}{6,3^2 \times 2 \times 3,14 \times 50} = 96,29 \mu F$$

**Induktor (L)**

$$L = \frac{1}{\omega_n^2 \times C} = \frac{1}{(2 \times 3,14 \times 250)^2 \times 96,29 \times 10^{-6}} = 4,21 mH$$

$$X_L = \omega_0 \times L = 2 \times 3,14 \times 50 \times 4,21 \times 10^{-3} = 1,32 \, \Omega$$

$$X_0 = X_L = 1,32 \, \Omega$$

Resistor (R)

$$R = \frac{X_0}{Q} = \frac{1,32}{45} = 0,029 \, \Omega$$

**Design filter Bus 831MV021 (Clay Crusher)**

**Single tuned orde 7, frekuensi tuning ( $\omega n$ ) = 350 Hz**

Kapasitor (C)

$$C = \frac{kVAR}{V_{l-l}^2 \times \omega_0} = \frac{1200}{6,3^2 \times 2 \times 3,14 \times 50} = 96,29 \, \mu F$$

Induktor (L)

$$L = \frac{1}{\omega_n^2 \times C} = \frac{1}{(2 \times 3,14 \times 350)^2 \times 96,29 \times 10^{-6}} = 2,15 \, mH$$

$$X_L = \omega_0 \times L = 2 \times 3,14 \times 50 \times 2,15 \times 10^{-3} = 0,68 \, \Omega$$

$$X_0 = X_L = 0,68 \, \Omega$$

Resistor (R)

$$R = \frac{X_0}{Q} = \frac{1,32}{45} = 0,015 \, \Omega$$

**Design filter Bus 831MV041 (Raw Mill)**

Pada bus 831MV041 terdapat 2 buah kapasitor bank, maka akan ada 2 buah filter yang dirancang pada bus ini. Jika melihat spektrum harmonisa dari bus 831MV041, nilai IHD terbesar pada orde 5 dan 11, sehingga 2 buah filter akan dirancang untuk orde 5 dan orde 11. Untuk pembagian nilai kVAR antara kedua filter ini, dapat dihitung dengan menggunakan rumus



$$\begin{aligned}
 kVAR \text{ orde } 5 &= \frac{IHD \text{ orde } 5}{IHD \text{ orde } 5 + IHD \text{ orde } 11} \times kVAR \text{ total bus} \\
 &= \frac{0,068}{0,068 + 0,076} \times 4350 = 2055 \text{ kVAR}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 kVAR \text{ orde } 11 &= \frac{IHD \text{ orde } 11}{IHD \text{ orde } 5 + IHD \text{ orde } 11} \times kVAR \text{ total bus} \\
 &= \frac{0,076}{0,068 + 0,076} \times 4350 = 2295 \text{ kVAR}
 \end{aligned}$$

**Single tuned orde 5, frekuensi tuning ( $\omega n$ ) = 250 Hz**

Kapasitor (C)

$$C = \frac{kVAR}{V_{l-l}^2 \times \omega_0} = \frac{2055}{6,3^2 \times 2 \times 3,14 \times 50} = 164,81 \text{ uF}$$

Induktor (L)

$$L = \frac{1}{\omega_n^2 \times C} = \frac{1}{(2 \times 3,14 \times 250)^2 \times 164,81 \times 10^{-6}} = 2,46 \text{ mH}$$

$$X_L = \omega_0 \times L = 2 \times 3,14 \times 50 \times 2,46 \times 10^{-3} = 0,77 \text{ } \Omega$$

$$X_0 = X_L = 0,77 \text{ } \Omega$$

Resistor (R)

$$R = \frac{X_0}{Q} = \frac{0,77}{45} = 0,017 \text{ } \Omega$$

**Single tuned orde 11, frekuensi tuning ( $\omega n$ ) = 550 Hz**

Kapasitor (C)

$$C = \frac{kVAR}{V_{l-l}^2 \times \omega_0} = \frac{2295}{6,3^2 \times 2 \times 3,14 \times 50} = 184,06 \text{ uF}$$

Induktor (L)

$$L = \frac{1}{\omega_n^2 \times C} = \frac{1}{(2 \times 3,14 \times 550)^2 \times 184,06 \times 10^{-6}} = 0,45 \text{ mH}$$

$$X_L = \omega_n \times L = 2 \times 3,14 \times 50 \times 0,45 \times 10^{-3} = 0,14 \Omega$$

$$X_0 = X_L = 0,14 \Omega$$

Resistor (R)

$$R = \frac{X_0}{Q} = \frac{0,14}{45} = 0,003 \Omega$$

**Design filter Bus 831MV051 (Kiln Preheater)**

$$\begin{aligned} kVAR \text{ orde } 11 &= \frac{IHD \text{ orde } 11}{IHD \text{ orde } 11 + IHD \text{ orde } 13} \times kVAR \text{ total bus} \\ &= \frac{2,79}{2,79 + 5,16} \times 4000 = 1404 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} kVAR \text{ orde } 13 &= \frac{IHD \text{ orde } 13}{IHD \text{ orde } 11 + IHD \text{ orde } 13} \times kVAR \text{ total bus} \\ &= \frac{5,16}{2,79 + 5,16} \times 4000 = 2596 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

**Single tuned orde 11, frekuensi tuning ( $\omega_n$ ) = 550 Hz**

Kapasitor (C)

$$C = \frac{kVAR}{V_{l-l}^2 \times \omega_0} = \frac{1404}{6,3^2 \times 2 \times 3,14 \times 50} = 112,60 \mu F$$

Induktor (L)

$$L = \frac{1}{\omega_n^2 \times C} = \frac{1}{(2 \times 3,14 \times 550)^2 \times 112,60 \times 10^{-6}} = 0,74 \text{ mH}$$

$$X_L = \omega_n \times L = 2 \times 3,14 \times 50 \times 0,74 \times 10^{-3} = 0,23 \, \Omega$$

$$X_0 = X_L = 0,23 \, \Omega$$

Resistor (R)

$$R = \frac{X_0}{Q} = \frac{0,23}{45} = 0,005 \, \Omega$$

**Single tuned orde 13, frekuensi tuning ( $\omega_n$ ) = 650 Hz**

Kapasitor (C)

$$C = \frac{kVAR}{V_{l-l}^2 \times \omega_0} = \frac{2596}{6,3^2 \times 2 \times 3,14 \times 50} = 208,20 \, \mu F$$

Induktor (L)

$$L = \frac{1}{\omega_n^2 \times C} = \frac{1}{(2 \times 3,14 \times 650)^2 \times 208,20 \times 10^{-6}} = 0,29 \, mH$$

$$X_L = \omega_n \times L = 2 \times 3,14 \times 50 \times 0,29 \times 10^{-3} = 0,09 \, \Omega$$

$$X_0 = X_L = 0,09 \, \Omega$$

Resistor (R)

$$R = \frac{X_0}{Q} = \frac{0,09}{45} = 0,002 \, \Omega$$

**Design filter Bus 831MV052 (Coal Mill)**

**Single tuned orde 11, frekuensi tuning ( $\omega_n$ ) = 550 Hz**

Kapasitor (C)

$$C = \frac{kVAR}{V_{l-l}^2 \times \omega_0} = \frac{2700}{6,3^2 \times 2 \times 3,14 \times 50} = 216,54 \, \mu F$$

Induktor (L)

$$L = \frac{1}{\omega_n^2 \times C} = \frac{1}{(2 \times 3,14 \times 250)^2 \times 216,54 \times 10^{-6}} = 0,39 \text{ mH}$$

$$X_L = \omega_0 \times L = 2 \times 3,14 \times 50 \times 0,39 \times 10^{-3} = 0,12 \Omega$$

$$X_0 = X_L = 0,12 \Omega$$

Resistor (R)

$$R = \frac{X_0}{Q} = \frac{0,12}{45} = 0,0027 \Omega$$

**Design filter Bus 831MV071 (Cooler)**

$$\begin{aligned} kVAR \text{ orde } 11 &= \frac{IHD \text{ orde } 11}{IHD \text{ orde } 11 + IHD \text{ orde } 13} \times kVAR \text{ total bus} \\ &= \frac{2,08}{2,08 + 0,73} \times 4000 = 2961 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} kVAR \text{ orde } 13 &= \frac{IHD \text{ orde } 13}{IHD \text{ orde } 11 + IHD \text{ orde } 13} \times kVAR \text{ total bus} \\ &= \frac{0,73}{2,08 + 0,73} \times 4000 = 1039 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

**Single tuned orde 11, frekuensi tuning ( $\omega_n$ ) = 550 Hz**

Kapasitor (C)

$$C = \frac{kVAR}{V_{l-l}^2 \times \omega_0} = \frac{2961}{6,3^2 \times 2 \times 3,14 \times 50} = 237,47 \mu F$$

Induktor (L)

$$L = \frac{1}{\omega_n^2 \times C} = \frac{1}{(2 \times 3,14 \times 550)^2 \times 237,47 \times 10^{-6}} = 0,35 \text{ mH}$$

$$X_L = \omega_0 \times L = 2 \times 3,14 \times 50 \times 0,35 \times 10^{-3} = 0,11 \, \Omega$$

$$X_0 = X_L = 0,11 \, \Omega$$

Resistor (R)

$$R = \frac{X_0}{Q} = \frac{0,11}{45} = 0,0024 \, \Omega$$

**Single tuned orde 13, frekuensi tuning ( $\omega n$ ) = 650 Hz**

Kapasitor (C)

$$C = \frac{kVAR}{V_{l-l}^2 \times \omega_0} = \frac{1039}{6,3^2 \times 2 \times 3,14 \times 50} = 83,33 \, \mu F$$

Induktor (L)

$$L = \frac{1}{\omega_n^2 \times C} = \frac{1}{(2 \times 3,14 \times 650)^2 \times 83,33 \times 10^{-6}} = 0,72 \, mH$$

$$X_L = \omega_0 \times L = 2 \times 3,14 \times 50 \times 0,29 \times 10^{-3} = 0,23 \, \Omega$$

$$X_0 = X_L = 0,23 \, \Omega$$

Resistor (R)

$$R = \frac{X_0}{Q} = \frac{0,23}{45} = 0,0051 \, \Omega$$

**Design filter Bus 831MV081 (Finish Mill 1)**

$$\begin{aligned} kVAR \text{ orde } 5 &= \frac{IHD \text{ orde } 5}{IHD \text{ orde } 5 + IHD \text{ orde } 7} \times kVAR \text{ total bus} \\ &= \frac{1,09}{1,09 + 1,93} \times 4000 = 1444 \, kVAR \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 kVAR \text{ orde } 7 &= \frac{IHD \text{ orde } 7}{IHD \text{ orde } 5 + IHD \text{ orde } 7} \times kVAR \text{ total bus} \\
 &= \frac{1,93}{1,09 + 1,93} \times 4000 = 2556 \text{ kVAR}
 \end{aligned}$$

**Single tuned orde 5, frekuensi tuning ( $\omega n$ ) = 250 Hz**  
 Kapasitor (C)

$$C = \frac{kVAR}{V_{l-l}^2 \times \omega_0} = \frac{1444}{6,3^2 \times 2 \times 3,14 \times 50} = 115,81 \text{ uF}$$

Induktor (L)

$$L = \frac{1}{\omega_n^2 \times C} = \frac{1}{(2 \times 3,14 \times 250)^2 \times 115,81 \times 10^{-6}} = 3,50 \text{ mH}$$

$$X_L = \omega_0 \times L = 2 \times 3,14 \times 50 \times 3,50 \times 10^{-3} = 1,10 \text{ } \Omega$$

$$X_0 = X_L = 1,10 \text{ } \Omega$$

Resistor (R)

$$R = \frac{X_0}{Q} = \frac{1,10}{45} = 0,0244 \text{ } \Omega$$

**Single tuned orde 7, frekuensi tuning ( $\omega n$ ) = 350 Hz**  
 Kapasitor (C)

$$C = \frac{kVAR}{V_{l-l}^2 \times \omega_0} = \frac{2556}{6,3^2 \times 2 \times 3,14 \times 50} = 204,99 \text{ uF}$$

Induktor (L)

$$L = \frac{1}{\omega_n^2 \times C} = \frac{1}{(2 \times 3,14 \times 350)^2 \times 204,99 \times 10^{-6}} = 1,01 \text{ mH}$$

$$X_L = \omega_0 \times L = 2 \times 3,14 \times 50 \times 1,01 \times 10^{-3} = 0,32 \text{ } \Omega$$

$$X_0 = X_L = 0,32 \, \Omega$$

Resistor (R)

$$R = \frac{X_0}{Q} = \frac{0,32}{45} = 0,0071 \, \Omega$$

**Design filter Bus 831MV081 (Finish Mill 2)**

$$\begin{aligned} kVAR \text{ orde } 11 &= \frac{IHD \text{ orde } 11}{IHD \text{ orde } 11 + IHD \text{ orde } 13} \times kVAR \text{ total bus} \\ &= \frac{0,59}{0,59 + 0,73} \times 4000 = 1788 \, kVAR \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} kVAR \text{ orde } 13 &= \frac{IHD \text{ orde } 13}{IHD \text{ orde } 11 + IHD \text{ orde } 13} \times kVAR \text{ total bus} \\ &= \frac{0,73}{0,59 + 0,73} \times 4000 = 2212 \, kVAR \end{aligned}$$

**Single tuned orde 11, frekuensi tuning ( $\omega_n$ ) = 550 Hz**

Kapasitor (C)

$$C = \frac{kVAR}{V_{l-l}^2 \times \omega_0} = \frac{1788}{6,3^2 \times 2 \times 3,14 \times 50} = 143,40 \, \mu F$$

Induktor (L)

$$L = \frac{1}{\omega_n^2 \times C} = \frac{1}{(2 \times 3,14 \times 550)^2 \times 143,40 \times 10^{-6}} = 0,58 \, mH$$

$$X_L = \omega_0 \times L = 2 \times 3,14 \times 50 \times 0,58 \times 10^{-3} = 0,18 \, \Omega$$

$$X_0 = X_L = 0,18 \, \Omega$$

Resistor (R)

$$R = \frac{X_0}{Q} = \frac{0,18}{45} = 0,004 \Omega$$

**Single tuned orde 13, frekuensi tuning ( $\omega_n$ ) = 650 Hz**

Kapasitor (C)

$$C = \frac{kVAR}{V_{l-l}^2 \times \omega_0} = \frac{2212}{6,3^2 \times 2 \times 3,14 \times 50} = 177,40 \mu F$$

Induktor (L)

$$L = \frac{1}{\omega_n^2 \times C} = \frac{1}{(2 \times 3,14 \times 650)^2 \times 177,40 \times 10^{-6}} = 0,34 \text{ mH}$$

$$X_L = \omega_0 \times L = 2 \times 3,14 \times 50 \times 0,34 \times 10^{-3} = 0,11 \Omega$$

$$X_0 = X_L = 0,11 \Omega$$

Resistor (R)

$$R = \frac{X_0}{Q} = \frac{0,11}{45} = 0,0024 \Omega$$

Tabel 4.15 dan Tabel 4.16 menunjukkan nilai komponen filter pasif single tuned yang akan digunakan sebagai pengganti kapasitor bank.

**Tabel 4.15** Parameter Filter Terpasang Pada Sistem

Bus	C (μF)	L (mH)	R (Ω)	Orde
831MV012	96.29	4.21	0.0290	5
831MV021	96.29	2.15	0.0150	7
831MV041	164.81	2.46	0.0170	5
831MV041	184.06	0,45	0.0030	11
831MV051	112.60	0.74	0.0050	11
831MV051	208.20	0.29	0.0020	13



**Tabel 4.16** Parameter Filter Terpasang Pada Sistem (Lanjutan)

Bus	C ( $\mu$ F)	L (mH)	R ( $\Omega$ )	Orde
831MV052	216.54	0.39	0.0027	11
831MV071	237.47	0.35	0.0024	11
831MV071	83.33	0.72	0.0051	13
831MV081	115.81	3.50	0.0244	5
831MV081	204.99	1.01	0.0071	7
831MV082	143.40	0.58	0.0040	11
831MV082	177.40	0.34	0.0024	13

#### 4.7. Simulasi Dan Analisa Harmonisa Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Filter Pasif Single Tuned

Setelah filter dipasang, maka perlu dilakukan simulasi kembali untuk melihat kondisi harmonisa sistem kelistrikan. Dari hasil simulasi yang ditunjukkan pada Tabel 4.17 sampai 4.20 dapat dilihat bahwa nilai THD V dan THD I pada sistem kelistrikan PT. Semen Indonesia mengalami penurunan setelah filter pasif single tuned terpasang.

**Tabel 4.17** Hasil Simulasi harmonisa pada Bus 6,3 kV (MV) dan 150 kV Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Filter Pasif Single Tuned

Bus	THD V (%)	Standar IEEE	THD I (%)	Standar IEEE
		THD V (%)		TDD (%)
BUS PLN	0	2,5	0,13	8
821MV011	0,08	5	0,17	5
821MV021	0,27	5	0,15	5
821MV031	0,18	5	0,23	5
831MV012	0,20	5	1,67	8
831MV021	0,16	5	3,62	8
831MV031	0,08	5	0,05	8
831MV041	0,07	5	0,24	5
831MV051	0,50	5	0,38	5
831MV052	0,16	5	1,12	8

**Tabel 4.18** Hasil Simulasi harmonisa pada Bus 6,3 kV (MV) dan 150 kV Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Filter Pasif Single Tuned (Lanjutan)

Bus	THD V (%)	Standar IEEE	THD I (%)	Standar IEEE
		THD V (%)		TDD (%)
831MV061	0,20	5	3,23	8
831MV071	0,34	5	1,01	5
831MV081	0,23	5	1,98	5
831MV082	0,27	5	2,06	5
831MV091	0,27	5	0,15	8
831MV101	0,18	5	0,10	12
831MV111	0,26	5	0,10	12
831MV121	0,26	5	0,10	12
831MV131	0,26	5	0,13	8

**Tabel 4.19** Hasil Simulasi harmonisa pada Bus 0,4 kV (LV) Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Filter Pasif Single Tuned

Bus	THD V (%)	Standar IEEE	THD I (%)	Standar IEEE
		THD V (%)		TDD (%)
831LV011	3,27	5	9,58	5
831LV021	0,91	5	2,11	5
831LV031	0,07	5	0,05	5
831LV041	0,04	5	0,04	5
831LV051	0,31	5	0,18	5
831LV052	0,32	5	0,18	5
831LV053	0,29	5	0,16	5
831LV054	0,13	5	0,08	5
831LV061	1,01	5	3,22	5
831LV071	0,25	5	0,16	5

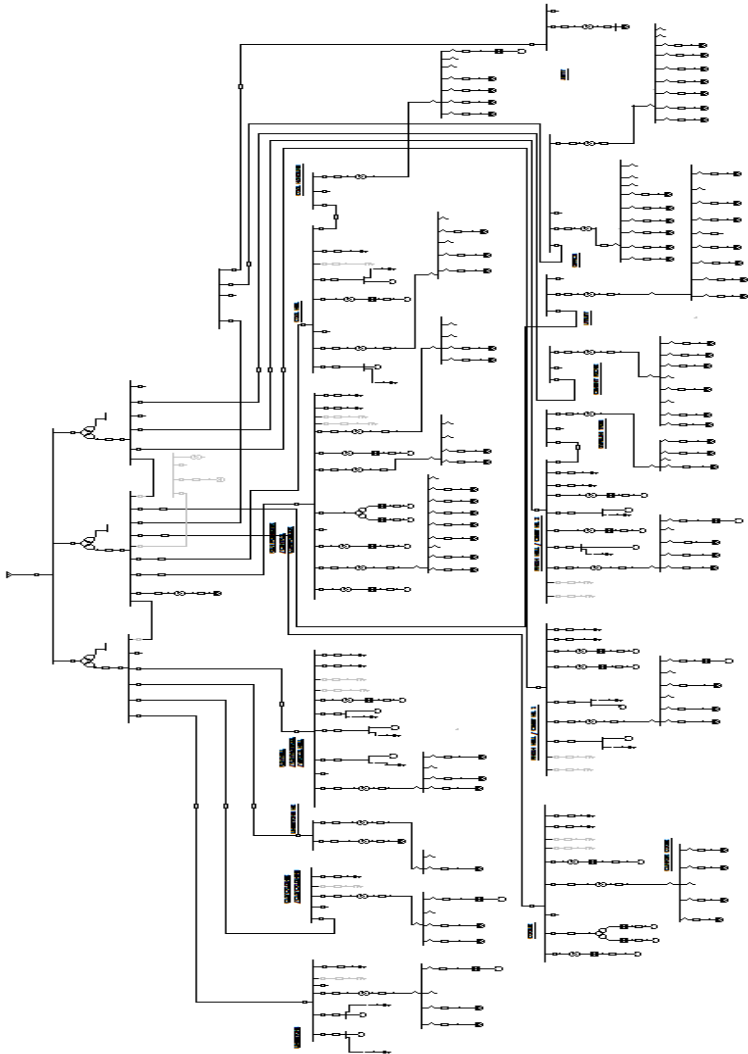
**Tabel 4.20** Hasil Simulasi harmonisa pada Bus 0,4 kV (LV) Sistem Kelistrikan Setelah Pemasangan Filter Pasif Single Tuned (Lanjutan)

Bus	THD V (%)	Standar IEEE	THD I (%)	Standar IEEE
		THD V (%)		TDD (%)
831LV081	0,34	5	0,50	5
831LV082	0,47	5	0,48	5
831LV091	0,25	5	0,15	5
831LV101	0,15	5	0,10	5
831LV111	0,18	5	0,11	5
831LV121	0,17	5	0,10	5
831LV122	0,18	5	0,12	5
831LV131	0,21	5	0,14	5

Dari hasil simulasi harmonisa setelah pemasangan filter diketahui bahwa Nilai THD V dan THD I mengalami penurunan yang significant, pada bus 831MV012, 831MV051, 831MV052, 831MV061, 831LV051, 831LV052, 831LV054, dan 831LV061 yang sebelumnya berada diluar standar THD V sekarang dibawah standar atau bisa dikatakan dalam kategori aman. Terbukti bahwa filter single tuned berhasil meredam harmonisa sistem kelistrikan PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## LAMPIRAN 1

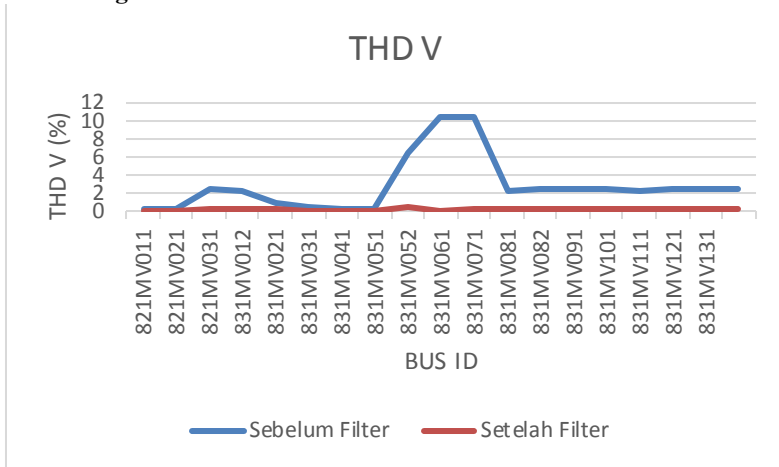


Gambar Single Line Diagram PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh

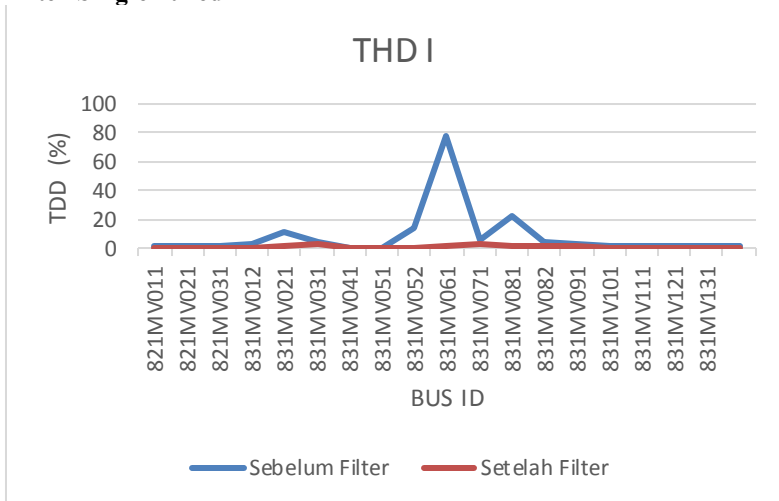
*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## LAMPIRAN 2

**Grafik Perbandingan THD V Sebelum Dan Sesudah Pemasangan Filter Single Tuned**



**Grafik Perbandingan THD I Sebelum Dan Sesudah Pemasangan Filter Single Tuned**



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Setelah melakukan studi harmonisa pada sistem kelistrikan PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh, dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Kondisi awal sistem sebelum terpasang kapasitor bank maupun filter sangat buruk. Banyak bus yang mengalami undervoltage dan nilai faktor dayanya sangatlah rendah, dibawah batas yang diijinkan PLN.
2. Filter pasif single tuned yang dipasang berhasil berfungsi dengan baik sebagai kompensator daya reaktif dan sebagai peredam harmonisa. THD V Bus 831MV051 dari 6,43% menjadi 0,50%. THD V Bus 831MV052 dari 10,38% menjadi 0,16%. THD V Bus 831MV051 dari 10,36% menjadi 0,20%.
3. Kualitas daya sistem kelistrikan PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh berada dalam kondisi yang baik, dari segi faktor daya, tegangan, dan harmonisa nya setelah dipasang filter single tuned. Nilai faktor daya sistem menjadi 94,1%. Nilai THD V dan THD I di bus MV dibawah 5%.

## 5.2 Saran

Saran yang dapat saya berikan setelah melaksanakan tugas akhir ini adalah:

1. Jika ingin meredam harmonisa lebih dalam, dapat ditambahkan filter harmonisa pada sisi bus 0,4 kV (LV).
2. Perlu diadakan studi lebih lanjut mengenai peredaman harmonisa di PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh yang mempertimbangkan faktor ekonomi dari peralatan yang akan dipakai sebagai peredam harmonisa.
3. Bagi suatu industri yang nilai faktor dayanya rendah, jika tidak memperhitungkan nilai ekonomi, lebih baik menggunakan filter sebagai kompensator daya reaktif dan peredam harmonisa, daripada menggunakan kapasitor bank yang meskipun memperbaiki faktor daya, tapi dapat menyebabkan harmonisa dan bisa menimbulkan resonansi paralel pada sistem.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEEE Std. 519-1992. "IEEE Recommended Practices and Requirement for Harmonic Control in Electrical Power Systems."
- [2] McGraw-Hill, "Electrical Power Systems Quality". Second Edition.
- [3] Annisa Eka Marini Pujiantar. 2014. Perencanaan Filter Hybrid untuk Mengurangi Harmonisa pada PT. Semen Indonesia Pabrik Rembang. Tugas Akhir Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [4] Rahmat Septian Wijanarko. 2014. Penentuan Peralatan untuk Meredam Harmonisa Berdasarkan Jenis Sumber Harmonisa, Orde, dan Magnitude Harmonisa dengan Memperhitungkan Biaya Investasi di PT. Wilmar Nabati, Gresik. Tugas Akhir Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [5] Ardian Rizkytama. 2009. Perencanaan High Pass dan Single Tuned Filter Sebagai Filter Harmonisa pada Sistem Kelistrikan Tabang Coal Upgrading Plant (TCUP). Tugas Akhir Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [6] Mohamed Awadalla, Mohamed Omer, dan Ahmed Mohamed, "Single-Tuned Filter Design for Harmonic Mitigation and Optimization with Capacitor Banks", IEEE Journal, 2015.
- [7] Francisco C. De La Rosa, "Harmonics and Power System".
- [8] Pujiantara, Margo, "Penyempurnaan Desain Filter Harmonisa Menggunakan Kapasitor Eksisting Pada Pabrik Soda Kaustik Di Serang Banten" Java-Journal, Elektro-ITS, 2003.
- [9] SPLN D5 004-1:2012, Power Quality, 2012.
- [10] Penangsang, Ontoseno, "Harmonisa" Teknik Elektro-ITS.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

## **BIODATA PENULIS**



Penulis bernama lengkap Stefanus Suryo Sumarno. Pria yang lahir di Surabaya pada tanggal 21 Januari 1992 ini menggemari desain grafis dan travelling. Penulis memulai jenjang pendidikannya di SDK Katarina (1998-2004), SMPK St. Yosef (2004-2007), SMK Kr. Petra (2007-2010), Program Diploma 3 Jurusan Teknik Elektro Industri PENS (2011-2014) dan kemudian melanjutkan pendidikannya di Jurusan Teknik Elektro ITS dan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis pernah menjadi anggota himpunan mahasiswa Elektro Industri PENS dan pernah aktif sebagai anggota Tim Mobil Listrik Cha PENS Proto serta mengikuti lomba Indonesia Energy Marathon Challenge 2013. Penulis pernah mengikuti PIMNAS XXVI yang diselenggarakan di Universitas Mataram Lombok September 2013.